



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de Ingeniería Mecánica
Área de Organización Industrial

PROYECTO FIN DE CARRERA

Simulación de terminales ferroviarias de transporte intermodal con zona de clasificación

Autor: Diego Cantelar Jiménez

Tutor: Alicia García Hernández

Leganés, junio de 2015



Índice general

Índice general	3
Índice de figuras	6
Índice de tablas	8
Capítulo 1.- Introducción	9
1.1 Antecedentes y alcance	9
1.2 Objetivos	10
1.3 Metodología de trabajo y cronograma	11
1.4 Estructura del proyecto.....	14
Capítulo 2.- Transporte intermodal. Situación en Europa y en España	18
2.1 Introducción al transporte intermodal.....	18
2.1.1 Unidades de carga del transporte intermodal.....	19
2.1.2 Equipos encargados de transferir carga entre modos	23
2.1.3 Factores que influyen en la elección de un modo de transporte y barreras del transporte intermodal.....	27
2.1.4 Ventajas del transporte intermodal e inconvenientes del transporte exclusivo por carretera.	28
2.2 Transporte en Europa	31
2.3 Transporte en España.....	36
2.4 Conclusiones	43
Capítulo 3.- Simulación de eventos discretos con Witness.....	45
3.1 Introducción a la simulación de eventos discretos	45
3.2 Etapas de un estudio de simulación.....	47
3.2.1 Formulación del problema.....	48
3.2.2 Recopilación de información.....	48
3.2.3 Construcción del modelo conceptual	49
3.2.4 Validación	49
3.2.5 Construcción del modelo de simulación.....	50
3.2.6 Verificación	50
3.2.7 Definición de escenarios	50
3.2.8 Experimentación y análisis de resultados	51
3.2.9 Presentación y uso de resultados.....	51
3.3 Entorno de simulación Witness.....	51
3.4 Uso de Witness para simular una terminal de transporte intermodal	57

Capítulo 4.- Estudio de terminales ferroviarias de contenedores	59
4.1. Sistema a analizar.....	59
4.2. Zona de clasificación de una terminal ferroviaria	64
4.2.1 Recursos e infraestructuras presentes en la zona de clasificación.....	64
4.2.2 Parque móvil.....	65
4.3. Procesos presentes en la zona de clasificación	66
4.3.1 Plan de trenes	67
4.3.2 Entrada de trenes en la zona de clasificación	68
4.3.3 Clasificación de las plataformas	69
4.3.4 Salida de trenes en la zona de clasificación	71
4.4. Resumen de la zona Carga/Descarga con grúas móviles	71
4.4.1 Recursos e infraestructuras	72
4.4.2 Procesos.....	74
4.5. Conclusiones	79
 Capítulo 5. Programación y verificación del modelo de simulación	80
5.1 Objetivos y estructura del modelo de simulación.....	80
5.2 Programación del modelo de simulación	81
5.2.1 Elementos representados	82
5.2.2 Procesos representados	89
5.2.3 Hipótesis asumidas en la programación del modelo	97
5.3 Flexibilidad aportada al modelo	97
5.4 Variables de salida.....	107
5.5 Verificación y validación del modelo de simulación.....	112
 Capítulo 6. Casos de estudio.....	115
6.1 Metodología de estudio	115
6.2 Escenario 1	119
6.2.1 Situación inicial.....	119
6.2.2 Resultados del Escenario 1	125
6.2.3 Conclusiones del Escenario 1	132
6.3 Escenario 2	133
6.3.1 Resultados del Escenario 2	133
6.3.2 Conclusiones del Escenario 2	134
6.4 Escenario 3	135
6.4.1 Resultados del Escenario 3	135
6.4.2 Conclusiones del Escenario 3	136



Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros	137
7.1 Conclusiones	137
7.2 Desarrollos futuros.....	139
 Capítulo 8.- Bibliografía	 141
 ANEXO: PRESUPUESTO	 145

Índice de figuras

FIGURA 1.1 CRONOGRAMA DE LAS DIFERENTES FASES DEL PROYECTO	13
FIGURA 2.1 A LA IZQUIERDA Y A LA DERECHA, CONTENEDOR PARA CARGA SECA NORMAL (BOLSAS, PALLETS, CAJAS, TAMBORES, ETC.). EN EL CENTRO, CONTENEDOR USADO PARA EL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS LÍQUIDAS	20
FIGURA 2.2 CONTENEDORES ADAPTADOS AL TIPO DE TTE. FOTO SUP. IZQ. CONTENEDOR SECO PARA TRANSPORTE MARÍTIMO Y TERRESTRE. FOTO SUP. DCHA. CONTENEDORES MARÍTIMOS. FOTO CENTRAL. CONTENEDORES FERROVIARIOS. FOTO INF. CONTENEDOR AÉREO	22
FIGURA 2.3 TIPOS Y MEDIDAS DE LOS CONTENEDORES	23
FIGURA 2.4 GRÚAS PÓRTICO USADAS EN EL TRANSPORTE FERROVIARIO	24
FIGURA 2.5 GRÚA MÓVIL	25
FIGURA 2.6 CARRETILLA PÓRTICO	26
FIGURA 2.7 TRACTORES DE MANIOBRAS	26
FIGURA 2.8 COMPARATIVA ENTRE EL TRANSPORTE INTERMODAL Y POR CARRETERA	30
FIGURA 2.9 PORCENTAJE DE MERCANCÍAS TRANSPORTADAS POR TREN, CARRETERA Y VÍAS FLUVIALES	32
FIGURA 2.10 TRANSPORTE DE MERCANCÍAS POR MODO MARÍTIMO EN LA UNIÓN EUROPEA EN MILES DE TONELADAS (2002-2009)	37
FIGURA 2.11 EVOLUCIÓN DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS TRANSPORTADAS POR FERROCARRIL EN ESPAÑA Y LA UE-15 EN TONELADAS-KILOMETRO. EN PORCENTAJE AÑOS 2000-2010	38
FIGURA 2.12 EVOLUCIÓN DEL TRANSPORTE DE MERCANCÍAS TRANSPORTADAS POR CARRETERA EN ESPAÑA Y LA UE-15 EN TONELADAS-KILOMETRO. EN PORCENTAJE 2000-2010	39
FIGURA 3.1 ETAPAS DE UN ESTUDIO DE SIMULACIÓN	48
FIGURA 3.2 ÁRBOL DE ELEMENTOS, VENTANA DE SIMULACIÓN Y ELEMENTOS DE DISEÑADOR	54
FIGURA 3.3 PANTALLA DEL MENÚ DETAIL DE UN ELEMENTO FÍSICO MACHINE	56
FIGURA 4.1 CUATRO REDES BÁSICAS DE TRANSPORTE	62
FIGURA 4.2 ORDEN DE PLATAFORMAS CON DIFERENTES DESTINOS	67
FIGURA 4.3 PLATAFORMAS CON DISTINTOS DESTINOS DENTRO DE LA TERMINAL	70
FIGURA 5.1 TREN ENTRANTE OCUPANDO LA VÍA DE ENTRADA	83
FIGURA 5.2 REPRESENTACIÓN DE UN TRACTOR DE MANIOBRAS	84
FIGURA 5.3 VÍAS DE CIRCULACIÓN DE TRENES ENTRE LA ZONA DE CARGA/DESCARGA Y DE CLASIFICACIÓN	85
FIGURA 5.4 TREN ENTRANTE RECORRIENDO LA VÍA DE ENTRADA	86
FIGURA 5.5 DETALLE DE LAS VÍAS DE CLASIFICACIÓN DE TRENES	88
FIGURA 5.6 DETALLE DE DIFERENTES ELEMENTOS REPRESENTANDO ESTADOS DE VÍAS	89
FIGURA 5.7 PROCESO DE ENTRADA DE UN TREN EN LA TERMINAL	90
FIGURA 5.8 TREN CON CUATRO PLATAFORMAS Y SIN CONTENEDORES POSICIONANDO EN UNA VÍA Y MACHINE VIA_CLASIFICA_OCUPADA OCUPADA PARA RESERVAR DICHA VÍA	90
FIGURA 5.9 TREN RECIÉN ENTRADO Y PREPARADO PARA QUE SUS PLATAFORMAS SEAN CLASIFICADAS	91
FIGURA 5.10 ELEMENTOS PARTS (PLATAFORMAS Y CONTENEDORES) EN EL ELEMENTO MACHINE RECOMPOSICIÓN CON ELEMENTO LABOR SIMULANDO EL TRACTOR DE MANIOBRAS	93
FIGURA 5.11 PLATAFORMAS CLASIFICADAS	94
FIGURA 5.12 TRENES SALIENTES EN SALIDA_TREN	95
FIGURA 5.13 TREN AL QUE SE LE ACABA DE ENGANCHAR EL TRACTOR DE MANIOBRAS PARA CIRCULAR HASTA LA ZONA DE CARGA/DESCARGA DE LA TERMINAL	96
FIGURA 5.14 TRENES SALIENTES DE LA ZONA DE CLASIFICACIÓN	96
FIGURA 5.15 MENSAJE DE ERROR AL INTRODUCIR UN DATO INCORRECTO	102
FIGURA 5.16 CUADRO DE DIÁLOGO DEL ELEMENTO VARIABLE MAX_VIAS_RECOMP	103
FIGURA 5.17 CUADRO DE DIÁLOGO DEL ELEMENTO QUE REPRESENTA LA VIA_CLASIFICA_PLATAFOR1	104



FIGURA 5.18 DATOS PARA ELABORAR UNA DISTRIBUCIÓN DEL TIEMPO QUE TARDA UN TREN EN RECORRER LA VÍA DE SALIDA Y BOTÓN PARA GENERAR EL FICHERO *.DST 105

FIGURA 5.19 ARCHIVO *.DST GENERADO POR LA MACRO 106

FIGURA 5.20 ORDEN PARA UNA DISTRIBUCIÓN LEA EL FICHERO *.DST GENERADO POR LA MACRO..... 107

FIGURA 5.21 EJEMPLO DEL FICHERO DE SALIDA QUE SE OBTIENE DE WITNESS Y DEL FICHERO DE VARIABLES DE SALIDA 108

FIGURA 6.1 DESCOMPOSICIÓN DEL TREN ENTRANTE CON ORIGEN 2 130

FIGURA 6.2 ESQUEMA DE VÍAS DE CLASIFICACIÓN/VÍAS DE ENTRADA/SALIDA 131



Índice de tablas

TABLA 6.1 PLAN DE TRENES DE LA ESTACIÓN SIMULADA	123
TABLA 6.2 NIVEL DE SERVICIO DE LA ZONA CARGA/DESCARGA	126
TABLA 6.3 USO DE RECURSOS E INFRAESTRUCTURAS DE LA ZONA CARGA/DESCARGA	128
TABLA 6.4 NIVEL DE SERVICIO DE LA ZONA DE CLASIFICACIÓN	129
TABLA 6.5 PORCENTAJE DEL USO TOTAL DE LOS TRACTORES DE MANIOBRAS	131
TABLA 6.6 USO DE LAS VÍAS DE CLASIFICACIÓN	132
TABLA 6.7 COMPARACIÓN DE MEDIAS ENTRE EL ESCENARIO 2 Y EL ESCENARIO 1	134
TABLA 6.8 COMPARACIÓN DE MEDIAS DEL ESCENARIO 3 Y EL ESCENARIO 1.....	136

Capítulo 1.- Introducción

En este capítulo se establecen los antecedentes y el alcance de este proyecto, sus objetivos y la metodología utilizada para alcanzarlos. Esta metodología se acompaña de un cronograma donde se recoge la duración de las diferentes fases del proyecto. Finalmente se resume el contenido de los diferentes capítulos en los que se estructura este documento.

1.1 Antecedentes y alcance

Este proyecto se enmarca dentro de una línea de investigación del Área de Ingeniería de Organización de la universidad Carlos III de Madrid. Dicha línea de investigación tiene como objetivo el estudio de terminales ferroviarias de transporte.

En esta línea, la directora de este proyecto desarrolló para su trabajo de fin de master una herramienta de simulación que permitía estudiar distintas terminales donde se intercambiaban contenedores entre trenes y camiones usando grúas móviles y pórtico (véanse más detalles en García Hernández, 2008). Esta herramienta consta de dos elementos: un modelo de simulación programado con *Witness PwE 2.0 Manufacturing Performance Edition* (en adelante “Witness”), que representa el diseño y el funcionamiento genérico de las terminales consideradas como objeto de estudio, y un fichero MS Excel, que permite particularizar las características concretas de la terminal a simular (el número de trenes entrantes y salientes, el número de grúas existentes, el número de vías de carga/descarga, etc.). Uno de los aspectos más interesantes de esta herramienta radica en su flexibilidad, la que permite utilizar el modelo de simulación sin necesidad de reprogramarlo, para analizar el nivel de servicio, la productividad y el uso de las infraestructuras y recursos de distintas terminales.

A este trabajo le siguieron otros dos. El primero proporciona más detalle sobre los mismos procesos simulados inicialmente y más flexibilidad al trabajo anterior (véanse más detalles en Cedrón Domínguez, 2011). El segundo se centra en otro tipo de terminales desarrollando un modelo para simular múltiples terminales operadas sólo por grúas móviles (véanse más detalles en Jiménez Treitas, 2011).

Además de los tipos de terminales ferroviarias ya mencionadas, existen otras. Por ejemplo, dentro de la red ferroviaria española existen unas que actúan como HUB, intercambiando plataformas entre trenes, función que puede darse de forma conjunta al intercambio de contenedores entre trenes y camiones o de forma aislada a esta última función. En esta línea es en la que se centra este proyecto con el objetivo de crear un modelo de simulación que permita representar la zona donde se intercambian plataformas entre trenes (en adelante zona de clasificación de plataformas) que poseen distintas terminales y que dicho modelo pueda actuar de forma aislada o de forma conjunta con la zona donde se intercambian contenedores entre trenes y camiones (en adelante zona de carga/descarga) modelada por Jiménez Treitas (2011).

1.2 Objetivos

Según el apartado anterior, el objetivo de este proyecto es crear un modelo de simulación que permita representar la zona de clasificación que poseen distintas terminales y que dicho modelo pueda actuar de forma aislada o de forma conjunta con la zona de carga/descarga.

Este objetivo general se desglosa en los siguientes objetivos particulares:

- Programar un modelo de simulación que cumpla con los siguientes requisitos:
 - Representar la zona de clasificación de múltiples terminales.

- Permitir la configuración de las características de esta zona a través de un fichero MS Excel.
- Permitir que esta zona pueda trabajar de forma independiente o conjunta con la zona de carga/descarga.
- Verificar el modelo de simulación de manera que se pueda tener un alto grado de confianza en que lo que se ha programado funciona tal y como se había planeado.
- Desarrollar un fichero MS Excel que permita a un usuario sin conocimientos de lo programado en el modelo de simulación configurar de forma fácil e intuitiva las características de la terminal a simular.
- Desarrollar un fichero MS Excel que facilite el estudio estadístico de los resultados proporcionados por el modelo de simulación.
- Emplear el modelo de simulación para el estudio de diversos escenarios, para proponer mejoras sobre las terminales representadas y para comparar estas configuraciones de mejora.

En este punto, cabe destacar que, además de la zona de clasificación simulada, las interfaces de entrada de datos y de salida de resultados implementadas usando ficheros Excel son originales de este proyecto fin de carrera, ya que, en los trabajos anteriores, no se contemplaban las especificaciones expuestas previamente.

1.3 Metodología de trabajo y cronograma

La primera fase de este proyecto consiste en un periodo de formación para comprender la programación y el funcionamiento de un modelo flexible de simulación con sus peculiaridades y características específicas, así como aprender

el funcionamiento de las herramientas software que son necesarias para llevar a cabo la configuración, programación y verificación del modelo de simulación.

Para llevar a cabo esta primera fase de formación, se estudiaron los modelos de los proyectos anteriores. Se hizo hincapié, principalmente, en entender las zonas de carga y descarga de cada uno de los dos trabajos para así poder desarrollar la zona de clasificación bajo la misma línea.

Tras este periodo de formación, se estudió el sistema que se quería simular.

Después de estudiar el sistema a simular, se desarrolló el modelo de simulación para la zona de clasificación. Para su desarrollo, se siguió una programación incremental, esto es, se programaba un proceso concreto y a continuación se verificaba para comprobar que lo programado hacía exactamente lo que se pretendía en un principio. Una vez hecho esto, se programaba el siguiente proceso, que a su vez volvía a ser verificado y así se iba aumentando el nivel de complejidad del modelo.

Cuando la zona de clasificación estuvo programada, se llevaron a cabo simulaciones de prueba para identificar errores y calibrar el modelo.

A continuación se integró el modelo que representaba la zona de clasificación con el de Jiménez Treitas (2011) y se volvió a verificar y realizar simulaciones de prueba.

Después, se creó una interfaz de entrada de datos con las explicaciones necesarias para que un usuario sin conocimientos de programación pudiera completarla y se vinculó con el modelo, haciendo las pruebas de verificación correspondientes. La interfaz de salida de resultados se creó inmediatamente después.

Por último se hicieron distintas simulaciones de prueba para comprobar que el conjunto (modelo de simulación, interfaz de entrada e interfaz de salida) funcionaban correctamente, se estudiaron diferentes casos y redactó la presente memoria.

La figura 1.1 muestra un cronograma con las diferentes fases de ejecución del proyecto y su duración en el tiempo.

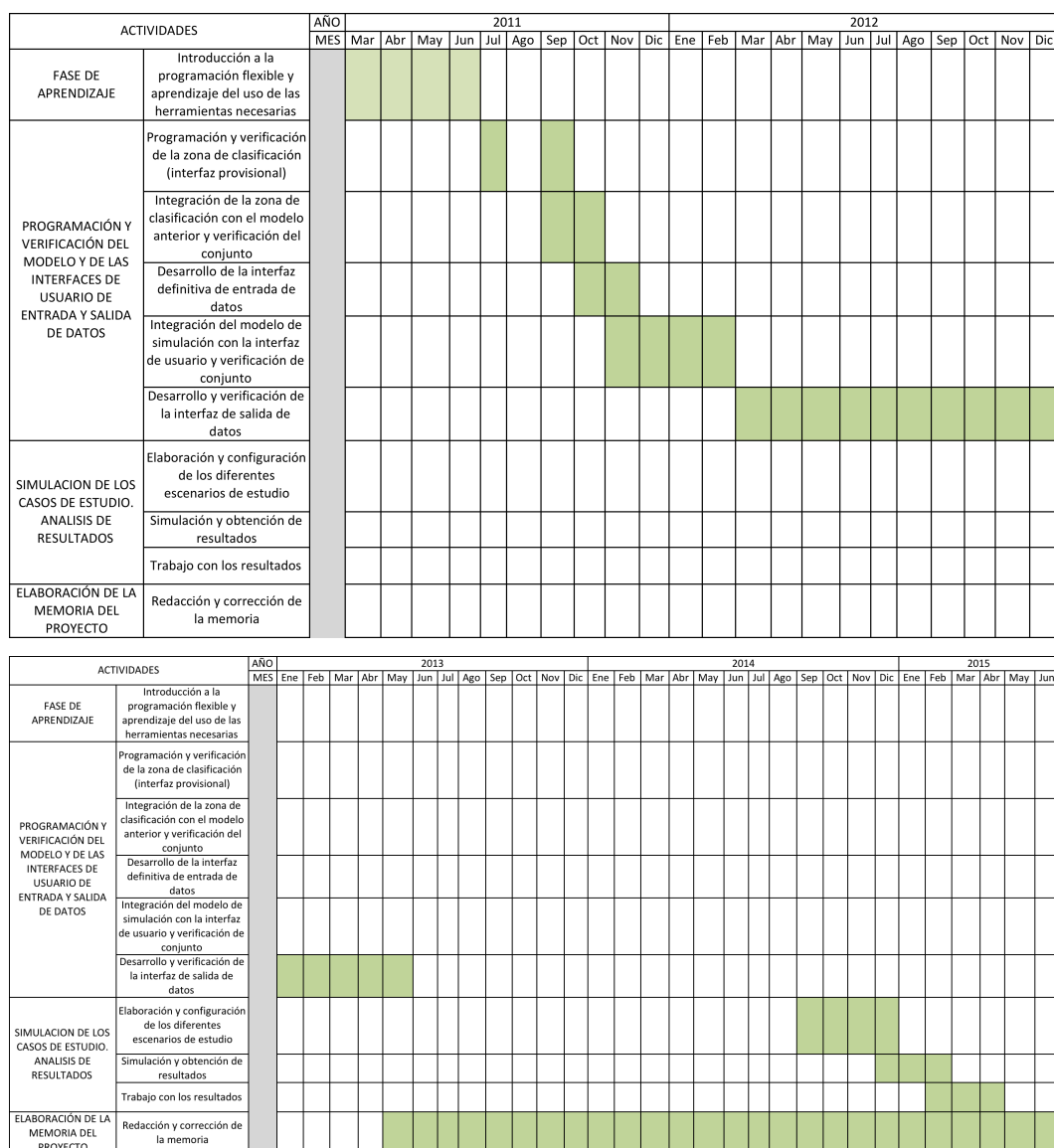


Figura 1.1 Cronograma de las diferentes fases del proyecto

Fuente: *Elaboración propia*

1.4 Estructura del proyecto

A continuación, se resume el contenido de los diferentes capítulos de esta memoria:

- Capítulo 2. Transporte intermodal. Situación en Europa y en España.

En este capítulo, se explica en qué consiste el transporte intermodal de mercancías (en adelante transporte intermodal), se dan definiciones de los elementos que lo componen y se comentan los pros y los contras que supone transportar mercancías de esta forma.

Posteriormente, se explica la situación del transporte intermodal en Europa, cuáles son los modos de transporte más utilizados y cuáles son las acciones llevadas por la Comisión Europea para alcanzar un sistema de transporte sostenible a largo plazo.

Después de tratar el marco europeo se explica la situación del transporte intermodal en España y cuáles son las medidas aplicadas por el Ministerio de Fomento español para cumplir con los objetivos europeos en materia de transporte.

- Capítulo 3. Simulación de eventos discretos con Witness.

En este capítulo se hace una introducción a la simulación de eventos discretos para así poder entender en qué consiste. Además, se justifica el uso de la simulación para el estudio que aquí se aplica frente a otras técnicas empleadas para estudiar terminales ferroviarias, como puede ser la experimentación con sistemas reales o la utilización de modelos matemáticos.

A continuación, se enumeran y detallan las diferentes fases o etapas que componen un estudio de simulación.

Una vez definidos estos aspectos, se hace una breve introducción sobre el software utilizado para programar el modelo presentado en este proyecto.

- Capítulo 4. Estudio de terminales ferroviarias de contenedores.

Este capítulo expone los distintos tipos de terminales que pueden componer una red ferroviaria de transporte. A continuación se incide en las terminales que poseen zona de clasificación, objeto de estudio en este proyecto, indicando el número de terminales de este tipo que hay con respecto al número total de terminales existentes en España, así como las operaciones que realizan y los recursos que utilizan.

- Capítulo 5. Programación de la interfaz de entrada de datos, del modelo de simulación y de los ficheros de resultados.

Este capítulo es el corazón del proyecto. En él se describe cómo se han representado los elementos que componen las terminales en el software de simulación utilizado (*Witness*) y cómo parametrizar dichos elementos mediante la interfaz de entrada de datos (*MS Excel*).

A continuación, se explican las hipótesis simplificadoras adoptadas a la hora de programar y configurar el modelo de simulación.

También se explica el fichero de entrada de datos utilizado para configurar el modelo. Este fichero se ha diseñado para que pueda ser utilizado por alguien que no tenga conocimientos sobre la programación del modelo de simulación.

Para finalizar, este capítulo trata la interfaz de salida de resultados, la cual es muy importante para poder analizar los resultados del modelo de simulación. Dicha interfaz permite realizar de forma automática el estudio estadístico de las variables de salida necesarias para evaluar el rendimiento de las terminales consideradas como objeto de estudio.

- Capítulo 6. Casos de estudio.

En este capítulo se plantean un conjunto de casos de estudio a analizar y se detalla la metodología utilizada para simular cada uno de ellos. Esta metodología consta, a grandes rasgos de lo siguientes pasos: Primero, se elabora un plan de trenes, se define la terminal a simular introduciendo los datos necesarios para la simulación en la interfaz de entrada de datos y se hace la simulación propiamente dicha. Una vez obtenidos los resultados se analizan estadísticamente y se exponen las conclusiones. A partir de aquí se presentan diferentes alternativas de mejora para el escenario inicial.

Para simular cada alternativa de mejora se modifica el fichero MS Excel de entrada de datos, se obtienen los resultados y se comparan con los del escenario inicial para ver si los cambios planteados mejoran el funcionamiento de la terminal.

- Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros.

En este capítulo se exponen las conclusiones obtenidas en relación a los objetivos planteados al inicio del proyecto.

Se presentan también posibles desarrollos a partir del presente proyecto que no han sido llevados a cabo y que llevarían a ampliar, por ejemplo, la flexibilidad del modelo de simulación.

- Capítulo 8. Bibliografía.

En este capítulo se detallan las referencias a los diferentes textos y artículos consultados para realizar este proyecto.



- Anexo. Presupuesto

En el presupuesto se cuantifican tanto los recursos materiales como humanos invertidos para la realización del proyecto fin de carrera.

Capítulo 2.- Transporte intermodal. Situación en Europa y en España

Este capítulo explica el significado del transporte intermodal, ofreciendo definiciones de los términos y elementos más utilizados, así como información de sus ventajas e inconvenientes, de sus barreras, y limitaciones, y de su comparación con otros tipos de transportes de mercancías.

Se expone también la situación del transporte intermodal en Europa y también se analizará la posición de este tipo de transporte en España.

2.1 Introducción al transporte intermodal

Dado que el transporte es una actividad fundamental en la sociedad actual, e incide de forma significativa en la riqueza económica y cultural de los países, en el desarrollo y bienestar de sus ciudadanos, es necesario describir y especificar términos para unificar criterios y actuaciones. En el escenario del transporte de mercancías, como en otros ámbitos, diferentes organizaciones, asociaciones y grupos han proporcionado definiciones relacionadas con el transporte intermodal. Se cita, entre otras a la Unión Europea (EU), la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas (UNECE), el Fórum Internacional del Transporte (ITF), el Ministerio de Fomento de España y la Conferencia Europea de Ministros de Transportes CEMT, 2011).

El transporte intermodal se define como “el movimiento de bienes o mercancías en una misma unidad de carga o vehículo que usa de forma sucesiva dos o más modos de transporte sin la manipulación del propio bien o mercancía al cambiar de modo” [UNECE, 2001 y Ministerio de Fomento, 2003].

Este intercambio de bienes o mercancías entre modos se realiza en terminales que son “un lugar físico equipado para el trasbordo y almacenamiento de unidades de transporte intermodal (UTI)” [UNECE, 2001 y Ministerio de Fomento, 2003]. En el transporte intermodal, las terminales también se denominan nodos de transferencia de carga.

Los modos de transporte que pueden intervenir en las terminales son el ferrocarril, fluvial, marítimo, aéreo y/o carretera.

Una particularidad de transporte intermodal es el transporte combinado que se define como "el transporte intermodal, en el cual se usa la carretera para la distancia más corta posible, recorriendo la distancia más larga usando el ferrocarril o el transporte marítimo" [Ministerio de Fomento, 2008. CEMT, 2011].

Este proyecto se centra en el transporte intermodal tren-carretera. Por tanto, en este apartado, se comentaran sus debilidades y amenazas y también sus fortalezas y oportunidades.

2.1.1 Unidades de carga del transporte intermodal

En el transporte intermodal, las mercancías se transportan en recipientes, que dependiendo de las propiedades y de la naturaleza de la mercancía a transportar, tienen formas y tamaños diferentes que facilitan el cambio de modo de transporte (trenes, camiones, barcos, aviones, etc.) sin manipulación directa de las mercancías transportadas, así como su apilamiento en las fases de almacenaje para optimizar espacio. [Ministerio de Fomento, 2008].

En el transporte intermodal, la unidad de carga más utilizada es el contenedor.

Un contenedor es un recipiente de dimensiones normalizadas que puede ser utilizado para transportar mercancías vía aérea, marítima y terrestre y que permiten proteger las mercancías de la climatología. Parte de estos contenedores están fabricados de acuerdo con la normativa ISO, en concreto, según la ISO-668; por ese motivo, también se conocen con el nombre de contenedores ISO. Los contenedores están fabricados con materiales resistentes que permiten su reutilización, y se utilizan para transportar todo tipo de objetos voluminosos: motores, máquinas, mercancía apilada en pallets, y también aunque de manera poco usual, mercancía a granel. Los tamaños de los contenedores se encuentran normalizados para facilitar su manipulación. Otra característica definitoria de los contenedores es la presencia, en cada una de sus esquinas, de huecos para los anclajes que les permiten ser enganchados por grúas, a la vez que facilitan la inmovilización en su transporte en buques, trenes, aviones y/o camiones. La normalización de formas y tamaños de los contenedores simplifica la transferencia de estas unidades de carga en las terminales.

En la figura 2.1, se muestran diferentes tipos de contenedores de diferentes formas, adecuados a las necesidades de las mercancías a transportar.



Figura 2.1 A la izquierda y a la derecha, contenedor para carga seca normal (bolsas, pallets, cajas, tambores, etc.). En el centro, contenedor usado para el transporte de mercancías líquidas

Fuente: *Banco de fotografías de la pagina web 123rf.com de páginas de transporte de mercancías en contenedores*

También existen contenedores específicos para un modo de transporte concreto (véase la figura 2.2):

- Contenedor terrestre.

Es un contenedor que cumple con las especificaciones de la International Railway Union (UIC). Se usa en el transporte en tren, carretera y mixto (Véase figura 2.1 izquierda y figura 2.2 superior izquierda y centro) .

- Contenedor marítimo.

Es un contenedor cerrado con protecciones antihumedad. Normalmente esta hecho de acero. Habitualmente se utilizan para transportar mercancía agrupada en pallets, pero también pueden transportar fardos, cajas, recipientes, etc. (Véase figura 2.1 derecha y figura 2.2 superior derecha) .

- Contenedor aéreo.

Es un contenedor que cumple las normas de navegación aérea (Véase figura 2.2 inferior) .



Figura 2.2 Contenedores adaptados al tipo de Tte. Foto sup. izq. Contenedor seco para transporte marítimo y terrestre. Foto sup. dcha. Contenedores marítimos. Foto central. Contenedores ferroviarios. Foto inf. Contenedor aéreo

Fuente: *Ministerio de Fomento. 2013*

Atendiendo a sus dimensiones exteriores, los contenedores pueden ser, entre otros tipos, de 45 pies, de 40 pies y 30 toneladas, de 30 pies y 25 toneladas, de 20 pies y 20 toneladas y de 10 pies y 10 toneladas. En este caso se usa como medida de longitud las unidades anglosajonas porque fue en estos países y en Norteamérica donde se comenzó a estandarizar sus dimensiones.

El contenedor más usado en Europa y en países orientales es el contenedor de 20 pies (6.096 metros), que se le denomina TEU (Twenty Foot Equivalent Unit). También existe un contenedor estandarizado con el mismo ancho pero con el

doble de largo, es decir, de 40 pies (12,2 m), denominado FEU (Forty Foot Equivalent Unit, FEU o feu), en el transporte de carga se consideran que son dos TEU.

A continuación se indican las capacidades y dimensiones internas de estos contenedores:

20 PIES STANDARD (DRY CARGO) 20' X 8' X 6'

Tara: 2210 - 2400 kg / Carga Máxima 21700 - 22400 kg / Capacidad Cúbica 33.3 m³

MEDIDAS	EXTERNA		INTERNA		PUERTA ABIERTA	
	Metros	Pies	Metros	Pies	Metros	Pies
LARGO	6.05	20'	5.90	19'4"		
ANCHO	2.43	8'	2.34	7'8"	2.33	7'8"
ALTO	2.59	8'6"	2.40	7'10"	2.29	7'6"

30 PIES STANDARD (DRY CARGO) 30' X 8' X 6'

Tara: 2980-3120 kg / Carga Máxima 26200 - 27000 kg / Capacidad Cúbica 49.5 m³

MEDIDAS	EXTERNA		INTERNA		PUERTA ABIERTA	
	Metros	Pies	Metros	Pies	Metros	Pies
LARGO	9.14	30'	8.90	29'6"		
ANCHO	2.43	8'	2.34	7'8"	2.33	7'8"
ALTO	2.59	8'6"	2.40	7'10"	2.29	7'6"

40 PIES STANDARD (DRY CARGO) 40' X 8' X 6'

Tara: 3630 - 3740 kg / Carga Máxima 31700 - 32500 kg / Capacidad Cúbica 67.7 m³

MEDIDAS	EXTERNA		INTERNA		PUERTA ABIERTA	
	Metros	Pies	Metros	Pies	Metros	Pies
LARGO	12.19	40'	12.03	39'6"		
ANCHO	2.43	8'	2.34	7'8"	2.33	7'8"
ALTO	2.59	8'6"	2.40	7'10"	2.29	7'6"

Figura 2.3 Tipos y medidas de los contenedores

Fuente: *Riquetransitos, 2013*

2.1.2 Equipos encargados de transferir carga entre modos

Las grúas pórtico, las grúas móviles y las carretillas pórtico son elementos fundamentales para transferir las unidades de carga (contenedores) entre los modos de transporte, en las terminales de transporte intermodal.

Una grúa pórtico es una infraestructura metálica formada por un puente elevado (pórtico) compuesto por dos vigas, soportadas por 4 columnas, que puede desplazar las cargas en sentidos vertical, horizontal o lateralmente, maniobrando sobre raíles o neumáticos dentro de una superficie limitada (véase la figura 2.4). La

grúa pórtico realiza el traslado de los contenedores y permite que los trabajos de carga y descarga se realicen de forma rápida y eficiente. El puente ha de ser manejado de forma manual y no automática según indica la ley que regula esta actividad. Estos equipos son frecuentes tanto en terminales de transporte intermodal terrestre como marítimo.



Figura 2.4 Grúas pórtico usadas en el transporte ferroviario

Fuente: *Adif, 2013*

Las grúas móviles son vehículos autopropulsados con un brazo especializado para la elevación y manipulación de contenedores (véase la figura 2.5). Estos equipos son muy utilizados en las terminales terrestres de transporte intermodal.



Figura 2.5 Grúa móvil

Fuente: *Elaboración propia en base a Adif (2013) y Grupotcb (2013)*

La carretilla pórtico es una estructura en forma de pórtico móvil que se desliza sobre 8 ruedas neumáticas. Posee un dispositivo de levantamiento de contenedores y durante el movimiento de la carretilla pórtico, el contenedor va alojado en el hueco de la estructura destinado a mover y a apilar contenedores. La cabina del conductor está en la parte superior de la carretilla pórtico para que la visibilidad hacia delante y hacia atrás sea máxima. A diferencia de las grúas móviles, este tipo de grúas suele ser más utilizado en terminales marítimas que terrestres.



Figura 2.6 Carretilla pórtico

Fuente: *Nauticexpo (2013)*

Además, en las terminales terrestres, existen otros equipos, como son los tractores de maniobra (véase la figura 2.7), que se utilizan para mover las plataformas de los trenes entre las vías electrificadas y no electrificadas de una terminal, así como para clasificar las plataformas que transportan los trenes entrantes para formar nuevos trenes salientes.



Figura 2.7 Tractores de maniobras

Fuente: *Renfe y Trenac (2013)*

2.1.3 Factores que influyen en la elección de un modo de transporte y barreras del transporte intermodal

En la sociedad actual, con una fuerte dependencia de la actividad comercial en la que el intercambio de productos, mercancías, bienes y servicios es uno de sus pilares sobre los que se asienta su razón de ser, una buena infraestructura de transporte proporciona a una empresa una superioridad sobre la competencia. El coste, la flexibilidad, la seguridad, el tiempo de entrega, etc., son elementos importantes a tener en cuenta a la hora de planificar la estrategia comercial de una empresa.

Para que las ventas se produzcan no basta con tener un producto bueno, a un precio conveniente y que sea conocido por los consumidores, sino que es necesario además que sea accesible para los consumidores. En este sentido, es preciso situar el producto en los puntos de venta donde los consumidores adquieren los bienes y para esto, uno de los medios con los que se cuenta es el transporte y entre ellos, el transporte intermodal [Lancaster y Massingham, 2001]. Este último, aún está afectado por una serie de dificultades que se describen a continuación y que inciden en su progresión y desarrollo:

- Dificultades Organizativas

Al ser un tipo de transporte en el que conviven muchas partes involucradas y carece aún de estructuras organizativas con responsabilidades y competencias.

- Dificultades Técnicas

Por falta de estandarización de ciertos elementos, como por ejemplo, en las unidades de carga empleadas.

- Dificultades Tecnológicas

Tecnologías de la información aún por desarrollar.

- Dificultades relativas a las infraestructuras

Como son, por ejemplo, los diferentes anchos de vía que existen en distintos países y las restricciones de capacidad en las terminales y en sus vías de acceso.

- Dificultades Económicas

Costes de inversión en equipos de las terminales intermodales, altos costes en el inicio y en el final de transporte, coste para mantener la capacidad de almacenamiento, etc.

- Dificultades Operativas

Dificultades logísticas relacionadas con el servicio, falta de transparencia en la cadena de transporte, falta de flexibilidad en los pedidos a corto plazo, prioridad para el transporte ferroviario de pasajeros, falta de servicios intermodales, falta de información sobre los servicios disponibles, falta de conciencia de las posibilidades del transporte intermodal, problemas de la integración del transporte intermodal en las cadenas logísticas de las empresas, etc.

- Dificultades políticas

Como la falta de un marco armonizado para la financiación del inicio y del final de transporte, creación de terminales, etc.

2.1.4 Ventajas del transporte intermodal e inconvenientes del transporte exclusivo por carretera.

Frente a las dificultades comentadas en el subapartado anterior, en las áreas con fuerte actividad económica y con un gran volumen de intercambios de productos y mercancías, y que además están lo suficientemente distantes, el transporte por carretera puerta a puerta no suele ser la opción más eficiente desde el punto de vista medioambiental o económico, siendo el transporte intermodal una solución competitiva y adecuada. El transporte intermodal presenta en este caso las siguientes ventajas [Víctor de Francisco. 2004]



- Reducción de los tiempos de transporte
Se utilizan los modos más adecuados para que la mercancía esté en su destino lo antes posible.
- Reducción de costes de transporte
Se utilizan rutas activas agrupando mercancías que confluyen en las mismas rutas o partes de la ruta y convergen en terminales, minimizando el uso de máquinas y operarios en las diferentes operaciones y maniobras durante el transporte.
- Reducción de los tiempos de carga y descarga
Debido a la agrupación de cargas en unidades de transporte intermodal (UTI) se puede reducir en un 70% el tiempo empleado en las tareas de carga y descarga.
- Reducción de los controles
Se precintan los contenedores y se mantiene el precintado hasta su destino, evitando comprobaciones en las diferentes fases o tramos del transporte.
- Reducción de documentos y permisos que se hacen por las unidades de carga y engloba a todas las mercancías que alojan
- Seguimiento de la mercancía
Se tiene la información y control de la mercancía en cada momento gracias a las aplicaciones informáticas con las que dispone el sector de transporte intermodal así como el intercambio electrónico de datos (EDI).
- Menor tasa de robos y daños por el control y precinto de los contenedores y que por tanto también incide en un precio más competitivo de los seguros que se hacen sobre los productos

- Permite llegar a nuevos mercados pues puede poner productos en mercados lejanos donde no está la producción, a precios competitivos gracias a la rapidez y capacidad de este tipo de transporte
- Reducción del impacto medioambiental, contaminación atmosférica y acústica, de accidentes y de incidencia en la movilidad

A continuación se muestra un cuadro comparativo entre el transporte intermodal y el transporte por carretera, que es el transporte más usado y común actualmente en Europa.

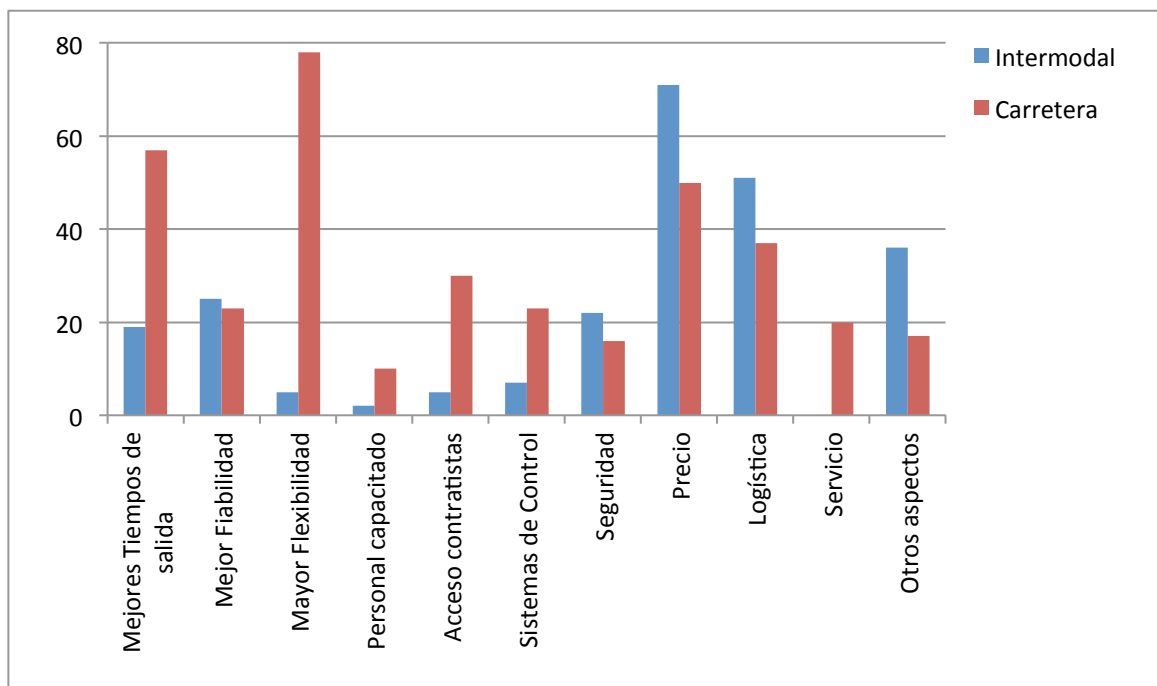


Figura 2.8 Comparativa entre el transporte intermodal y por carretera

Fuente: *IQ, 2008*

Según lo expuesto en la figura 2.8, es en precio y en estructura logística donde el transporte intermodal tiene sus principales ventajas en esta comparativa, y equivalentes o incluso mejores en fiabilidad y seguridad entre otros aspectos. Se

aprecia también que la flexibilidad en el transporte, es el aspecto donde el transporte intermodal tiene una de sus limitaciones.

Actualmente, el transporte intermodal es menos flexible que el transporte por carretera, pero en este punto debemos indicar que el transporte por carretera, está alcanzando cotas de saturación. El uso común de las mismas infraestructuras como son las carreteras para el transporte de personas y mercancías provoca colapsos. Son también elementos a tener en cuenta las directrices medioambientales (los problemas de polución, acústicos, etc.) que afectan directamente al transporte por carretera. Por estas razones, entre otras, los gobiernos y organizaciones de la UE tienen en estudio la creación de un marco común, necesario para fomentar el transporte intermodal, e impulsar su crecimiento, que, a pesar de poseer un gran potencial, no ha sido explotado por falta de competitividad en el mercado actual.

2.2 Transporte en Europa

La Comisión Europea, en informes emitidos en 2001, detectó la necesidad de hacer reformas y modificaciones de calado en el transporte de mercancías y personas. Aunque de forma desigual estos tipos de transporte han experimentado un aumento significativo y necesitan que se dote de las correspondientes infraestructuras. Los principios globalizadores que prevalecen en Europa requieren acciones que homogenicen su uso y eviten el colapso que la situación actual puede provocar en un futuro próximo.

Es necesario combinar el transporte por carretera, con la utilización del transporte por tren y barco y acometer políticas de actuación que fomenten su expansión. La Comunidad Europea es heterogénea en este aspecto y no beneficia estos propósitos, en algunos países del este de Europa, el transporte de mercancías por ferrocarril está perdiendo el liderazgo que había tenido durante la última década del siglo pasado, y en el resto de Europa la situación es aún más

comprometida para los medios de transporte distintos al de carretera. Los gobiernos y organizaciones de la UE han propuesto medidas para cumplir sus directrices. Sin embargo las medidas propuestas no han permitido que el transporte ferroviario crezca a los niveles deseados como se puede apreciar en la figura 2.9.

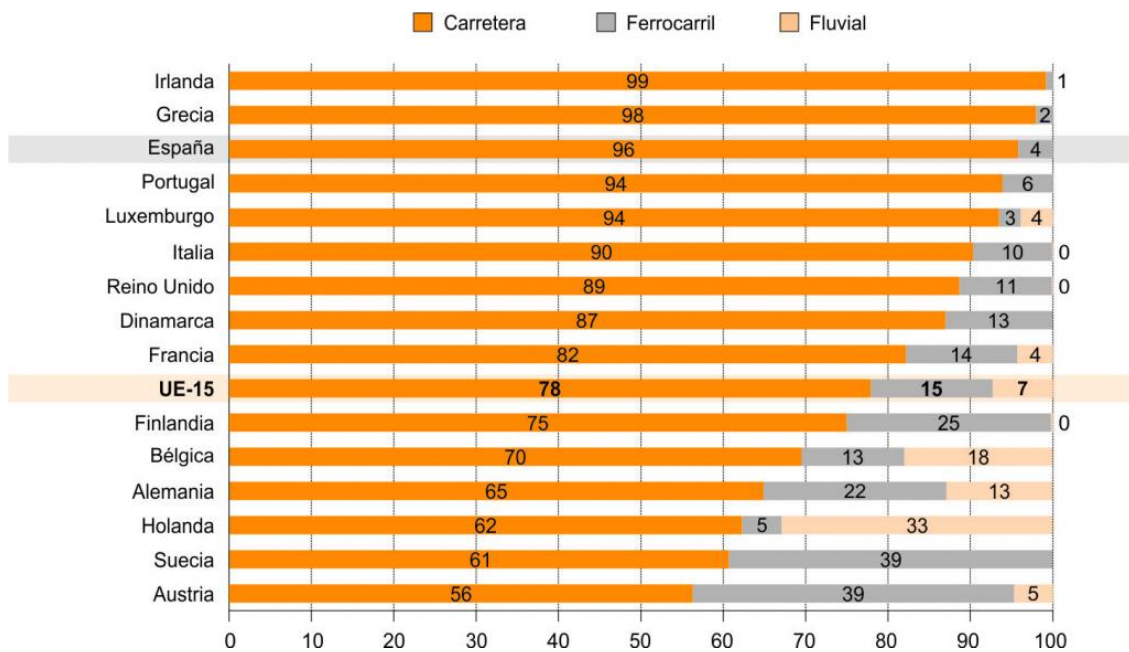


Figura 2.9 Porcentaje de mercancías transportadas por tren, carretera y vías fluviales

Fuente: *Informe España 2012. Fundación CECS. 2012*

La figura 2.9 refleja el porcentaje de mercancías transportadas por tren, carretera y vías fluviales en el año 2010. Se puede apreciar que, en todos los países, el volumen de las mercancías transportadas por carretera es muy superior a las transportadas por los otros medios.

Ante esta situación, es necesario potenciar la utilización de las opciones ferroviarias, marítimas y fluviales para los movimientos de media y larga distancia de las mercancías, mejorando y ampliando los corredores para las redes de transporte, ampliar la red de alta velocidad ferroviaria al transporte de mercancías, dotar de mejores equipos de mercancías en los puertos marítimos y crear nuevas infraestructuras en las terminales de carga de los aeropuertos.

Todas estas medidas deben hacerse de forma coordinada en los países de la Unión Europea y deben estar potenciadas por las subvenciones y financiación proveniente de los Fondos que la UE aporta a los países miembros para poner en marcha estas políticas estructurales.

- En el horizonte del año 2050, la Comisión indica los siguientes objetivos [Libro Blanco 2050, 2001]:
 - Más y mejores infraestructuras, el uso de nuevas tecnologías, y la creación e instauración de corredores para las mercancías, para que el 30% de las mercancías en distancias superiores a 300 km se transporten en barco o tren en el año 2030 y vaya aumentando progresivamente y llegue al 50% en el año 2050.
 - La red ferroviaria para el tren de alta velocidad debe ser una realidad para la totalidad de viajeros y destinos, en el año 2050. La malla de corredores y conexiones con aeropuertos, puertos y vías ferroviarias de alta velocidad que conforma la Red de Transporte Transeuropeo debe estar terminada para esta fecha.

Las acciones que está acometiendo la Unión Europea en la actualidad para lograr estos objetivos son:

- El desarrollo de proyectos para unificar las diferencias en las redes de transporte y su control y gestión y está realizando proyectos como son el Sistema de Control del Tráfico, Aéreo Europeo (SESAR), el Sistema de Control del Tráfico Ferroviario Europeo (ERTMS), el Sistema Inteligente de Transporte (ITS), etc.
- Acciones de transferencia entre modos de transporte cuya finalidad es la transferencia de una parte del tráfico rodado a otros modos de transporte mediante una ayuda de puesta en marcha para nuevos servicios de transporte de mercancías distintos del transporte por carretera. En esta línea, la



cofinanciación asciende hasta el 30 % en la creación de nuevos servicios de transporte de mercancías que no utilicen la carretera.

- Acciones de efecto catalizador en favor de proyectos innovadores destinados a paliar las insuficiencias estructurales de los mercados. Esta ayuda se ha destinado, por ejemplo, a la creación de autopistas marítimas o de servicios internacionales de transporte ferroviario de mercancías de calidad, gestionados por empresas que ofrezcan todo el servicio. Estas medidas han contribuido a cambiar la forma en que se lleva a cabo el transporte de mercancías distinto del transporte por carretera y en que se utilizan las redes transeuropeas de transporte o los corredores transeuropeos. El importe máximo de la ayuda ha sido de un 35%.
- Acciones de aprendizaje en común, con el objetivo de reforzar la cooperación y el intercambio de conocimientos entre los operadores de los mercados de la logística del transporte de mercancías a fin de mejorar el impacto medioambiental del sector. La ayuda financiera comunitaria se ha limitado al 50%.

A diferencia de otros modos de transporte, como el ferrocarril, el transporte de mercancías por carretera depende en gran parte de las energías fósiles, que contribuyen de forma considerable a la producción de CO₂. Además, debe afrontar el problema de la congestión de las infraestructuras. En este contexto, es necesario un mayor uso de la intermodalidad para contribuir a una utilización más adecuada de los recursos existentes. Para ello es importante integrar en la cadena logística el transporte marítimo de corta distancia, el transporte ferroviario y el transporte fluvial. En esta línea, el objetivo del programa Marco Polo II (2007-2013) es desviar las mercancías del transporte por carretera a otros modos más compatibles con el medio ambiente.

El programa Marco Polo II (comprendido entre el 1 de enero de 2007 y el 31 de diciembre de 2013) recoge los objetivos del primer programa Marco Polo, desarrollado a lo largo de los años 2003 al 2006, y cuenta con una dotación financiera de 450 millones EUR para su ejecución.

El programa Marco Polo II propone una cobertura geográfica más amplia que el primer programa Marco Polo. Se aplica, así, a acciones que se refieren al territorio de al menos dos países de la UE o de al menos un país de la UE y un país cercano no miembro de la UE [Comisión Europea, 2013a y Comisión Europea, 2013b].

Las acciones que pueden optar a ayuda son las siguientes:

- Las acciones de efecto catalizador:

Acciones dirigidas a superar los obstáculos estructurales importantes en el mercado de la UE del transporte de mercancías que dificulten el funcionamiento eficaz de los mercados, la competitividad del transporte marítimo de corta distancia, ferroviario o por vías navegables interiores, y/o la eficacia de las cadenas de transporte que utilizan estos modos de transporte. Su objetivo es mejorar las sinergias en los sectores del transporte ferroviario, del transporte por vías navegables interiores y del transporte marítimo de corta distancia, incluidas las autopistas del mar, para una utilización más adecuada de las infraestructuras existentes.

- Las acciones de transferencia modal:

Acciones dirigidas a transferir el transporte de mercancías de la carretera a las vías marítimas de corta distancia, al ferrocarril, a las vías navegables interiores o a una combinación de modos de transporte. El objetivo es que el trayecto por carretera sea lo más corto posible.

- Las acciones de aprendizaje en común:

Acciones dirigidas a mejorar la cooperación para optimizar, de manera estructural, los métodos y procedimientos de trabajo en la cadena de transporte de mercancías, teniendo en cuenta las exigencias de la logística.

- Las acciones orientadas a crear autopistas del mar:

El objetivo de esta idea, presentada en el Libro Blanco de 2001 sobre la política europea de transportes, es transferir de forma directa una parte del transporte de las mercancías de la carretera a las vías marítimas de corta distancia o a una combinación de transporte marítimo de corta distancia con otros modos de transporte en la que el trayecto por carretera sea lo más corto posible. Por ejemplo, podrían crearse autopistas del mar entre Francia y España para evitar la congestión en las carreteras de los Pirineos.

- Las acciones de evitación del tráfico rodado:

Acciones innovadoras destinadas a integrar el transporte en la logística de la producción para evitar un gran porcentaje de transporte de mercancías por carretera, sin repercutir negativamente sobre los resultados de producción o el empleo.

La Unión Europea guía y facilita a los países que la integran para que a pesar de sus diferencias y prioridades, acometan acciones encaminadas a unificar formas, infraestructuras, esfuerzos y objetivos que lleven a crear una red de transporte de mercancías moderna, ecológica, sostenible, rentable y eficaz.

2.3 Transporte en España

España, por su situación geográfica, en el extremo occidental de Europa, con muchos kilómetros de costa en el océano Atlántico y en el mar Mediterráneo puede convertirse en uno de los principales puntos de intercambio modal de mercancía que proviene por barco de los países asiáticos y orientales, (China, Japón, Corea,

etc.; países de gran pujanza económica y comercial en la actualidad), de los países americanos (fundamentalmente sudamericanos) y de la costa este de África.

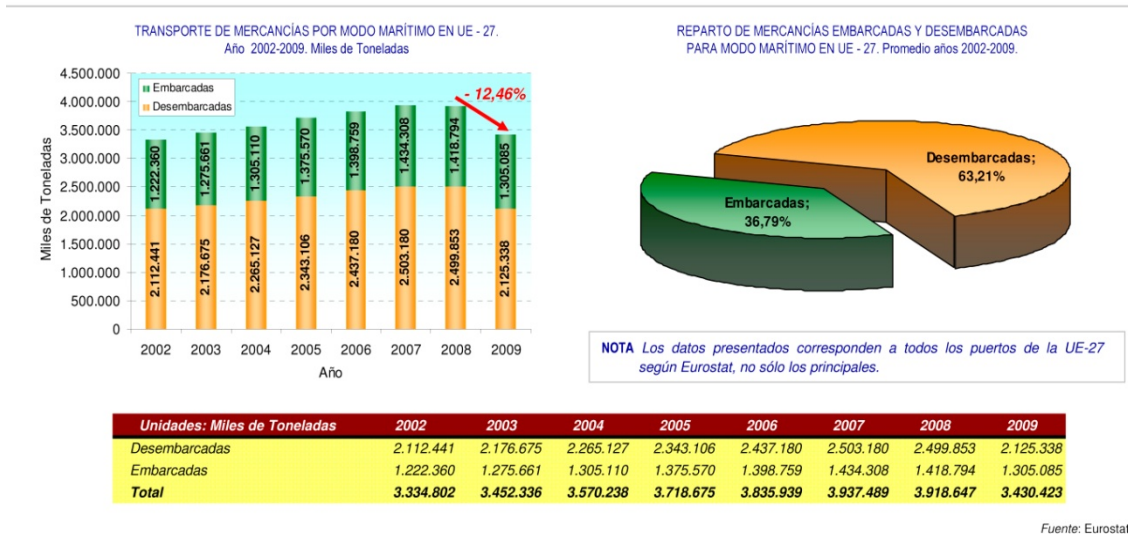


Figura 2.10 Transporte de mercancías por modo marítimo en la unión europea en miles de toneladas (2002-2009)

Fuente: *Ministerio de Fomento, 2011*

En relación al uso de otros modos de transporte, la figura 2.10, muestra que el transporte marítimo en la UE-27 crece, aunque si obviamos el año 2009 en que la repercusión de la crisis económica que empezó a manifestarse en Europa hizo decrecer la actividad industrial y esta se ve claramente reflejada en la actividad comercial. Este tipo de transporte crece en la mayoría de los países analizados con excepción de Francia y Polonia donde tiene valores similares en el periodo analizado. y es ampliamente utilizado en el Reino Unido y los Países Bajos por sus condiciones geográficas, e inapreciable en Austria y República Checa por ser países de interior y carecer de costas.

El gran volumen de productos recibidos por transporte marítimo requiere la creación de grandes corredores ferroviarios que permitan unir los puertos marítimos de entrada de mercancía con los grandes centros industriales de producción y de venta europeos, ubicados principalmente en el norte de Europa,

en concreto, en Alemania, Francia, Países Bajos y Reino Unido. [Ministerio de fomento, 2013a]

En la figura siguiente podemos ver el uso del transporte por tren en los países de la Unión Europea en el periodo de 2000 a 2010. Como se puede apreciar en la figura 2.11, el transporte de mercancías por tren en España ha descendido en los últimos años en comparación con la tendencia mantenida en la UE durante este mismo período.



Figura 2.11 Evolución del transporte de mercancías transportadas por ferrocarril en España y la UE-15 en toneladas-kilometro. En porcentaje años 2000-2010

Fuente: *Informe España 2012. Fundación CECS*

En efecto, la figura 2.11 muestra que mientras que en la Unión Europea el 15% del volumen de las mercancías transportadas se mueven por ferrocarril, en España, esta proporción se ha reducido de forma progresiva hasta rondar el 5% en 2010 a partir de la fuente Eurostat, se ha podido identificar que entre Alemania y Polonia transportan tantos miles de toneladas, como el resto de países que componen la UE-15 juntos. Analizando esta fuente de información, también se ha

podido identificar que en Alemania, Austria e Italia el uso del transporte por ferrocarril tiende a crecer.

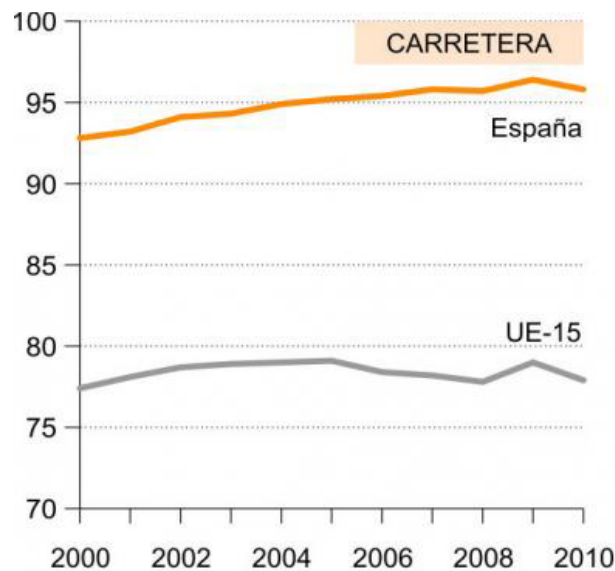


Figura 2.12 Evolución del transporte de mercancías transportadas por carretera en España y la UE-15 en toneladas-kilometro. En porcentaje 2000-2010

Fuente: *Informe España 2012 Fundación CECS*

En la figura 2.12 se observa que el volumen de toneladas transportadas por carretera en España está en torno al 95%. Este alto porcentaje de utilización de la carretera, unido a los inconvenientes que presenta este modo, justifica la necesidad de cambiar esta situación tal como se ha expuesto anteriormente.

En España, el Ministerio de Fomento es el que tiene las competencias en el transporte de mercancías y el encargado de desarrollar las políticas adecuadas para llevar a cabo las actuaciones y planes de desarrollo que permitan garantizar un sistema de transporte sostenible a largo plazo. En esta línea, es el encargado de fomentar la utilización de otros modos de transporte distintos a la carretera, además de mejorar su competitividad, entre otros aspectos.

Actualmente el Ministerio de Fomento tiene en marcha el Plan Estratégico de Infraestructuras y Transporte (PEIT) que persigue la mejora de los servicios de transporte en el marco contractual, corrigiendo las situaciones de desequilibrio existentes, creando una convergencia creciente entre el marco contractual en los diversos modos y clarificando los derechos y obligaciones de cada parte en los servicios intermodales.

Además del PEIT, hay otras medidas a nivel español en marcha con la idea de modernizar la red de transporte existente dotándola de las características exigibles para impulsar el transporte ferroviario de mercancías y la intermodalidad.

En el caso español, el ferrocarril, que no puede atender la demanda por carecer de la oferta adecuada, necesita de la reforma correspondiente para cumplir con los requisitos que se le requieren y para ser el sustituto eficaz al transporte por carretera y aumentar la relación entre ambos tipos de transporte. Para satisfacer estos objetivos [Ministerio de Fomento, 2011]:

Hay que ampliar y elevar el número de terminales intermodales para el transporte de mercancías, las que combinan tren y barco, para disminuir costes y su transporte sea competitivo.

Crear medidas de control y de fiabilidad en el uso de las infraestructuras ferroviarias y de la oferta de servicios.

Y hace recomendaciones puntuales sobre los corredores españoles en concreto:

- Corredor mediterráneo

Al estar equipado el tramo entre Barcelona y Perpiñán (Francia) con ancho de vía internacional (Ancho UIC, 1435mm entre las caras internas de los rieles)

permite su utilización sin los inconvenientes de cambio de ancho de vía para el transporte a gran escala de personas y mercancías, además de servir como puente para la modernización de las líneas de su entorno y transformarlas para su uso en el transporte de mercancías

- Corredor atlántico

Con las actuaciones ya realizadas en el punto de transferencia intermodal de Irún-Hendaya que le conecta con el corredor occidental Francés de Tours-Burdeos las operaciones han aumentado en los últimos años casi un 200% y con previsiones de aumentar. El aumento de la longitud de los trenes y la creación de la llamada “Y Vasca” potenciarán su uso.

- Viabilidad de una línea ferroviaria Pau - Canfranc – Zaragoza

La especial orografía por la que transcurre esta línea necesita de grandes aportaciones económicas. A pesar de haberse ya inyectado grandes cantidades de dinero, todavía es necesario unificar el ancho de vía. Y sus expectativas son de transportar 3 Millones de toneladas al año en esta línea de 300 km.

Como se ha apuntado anteriormente, el intercambio modal en el transporte de mercancías a través de los puertos marítimos con los países asiáticos y sudamericanos y el uso del ferrocarril con Europa son las piedras fundamentales, claves para el futuro inmediato de España, por lo que los grandes puertos deben evolucionar hacia grandes terminales de transporte intermodal creando y favoreciendo su intercambio con la red ferroviaria, logrando un complemento eficaz y armonizado entre estos modos de transporte dotándolos de elementos de gestión modernos y normativas que les confiera de las coberturas legales, políticas y financieras adecuadas.

Los principales retos a los que se enfrenta el sistema español de transporte de mercancías y la intermodalidad en España serían los siguientes [Ministerio de Fomento, 2011]:

- Coordinación general del sistema entre los nodos y los ejes de infraestructuras, entre las políticas y actuaciones de los entes dependientes de la Administración Central y las Autonomías, entre las actuaciones en transporte, economía y medioambiente, entre las iniciativas públicas y privadas
- Mejora de la integración y posicionamiento logístico e intermodal internacional de España, principalmente respecto a la UE: mejora de la conectividad intermodal terrestre transfronteriza con Europa, interoperabilidad ferroviaria, potenciamiento de la intermodalidad marítima, aprovechamiento del potencial geoestratégico español, etc.
- Mejora de la competitividad del modo ferroviario: aprovechamiento del potencial de capacidad del sistema ferroviario, racionalización del sistema de terminales, competitividad y calidad de los servicios intermodales, acceso de los nuevos operadores, etc.
- Fomentar la logística e intermodalidad marítimo-portuaria, con los puertos como nodos logísticos claves del sistema: desarrollo y mejora de la intermodalidad ferroportuaria, desarrollos logísticos portuarios, potenciamiento del TMCD
- Contribución efectiva de la intermodalidad al sistema de transporte de mercancías: adecuación de normativas, apoyos e incentivos, formación y alianzas, etc.
- Competitividad y calidad del sistema: mejora de los servicios y sistemas de comercialización, medidas en cada modo, competitividad en la gestión de terminales, fomento y aplicación de nuevas tecnologías
- Reconversión sostenible del sistema, mediante el potenciamiento de los modos masivos menos contaminantes, el desarrollo general de la intermodalidad y la

integración de las políticas y actuaciones del transporte en las estrategias de desarrollo regional

- Impulso de políticas de I+D+I que fomenten nuevas tecnologías aplicadas al transporte intermodal.

2.4 Conclusiones

En España y en Europa, el transporte de mercancías ha experimentado un fuerte crecimiento en las últimas décadas. Este crecimiento ha sido desigual y descompensado entre modos. De tal forma que se requieren actuaciones sin demora para evitar que el transporte mayoritariamente utilizado, el transporte por carretera, colapse la red de transporte. Además, existen otras razones, por ejemplo, de compromiso con la sociedad (como son la necesidad de disminuir la tasa de accidentes en la carretera y los riesgos medioambientales) para intentar reducir el uso de este modo.

Para equilibrar el uso de los modos de transporte, sería necesario llevar carga del transporte por carretera hacia el transporte ferroviario y el transporte marítimo. El transporte intermodal tren-carretera, donde se usa el ferrocarril para trayectos a media y larga distancia complementándolo con el transporte por carretera para las fases inicial y final del transporte, es una alternativa para reducir el peso relativo de la carretera.

A pesar de las ventajas que presenta el transporte intermodal tren-carretera, existen barreras y limitaciones que necesitan de trabajo firme y decidido para su desarrollo como son la adaptaciones de las vías ferroviarias al ancho europeo, la búsqueda de homogeneidad en los términos y procesos europeos, etc. De ahí que siga siendo necesario el fomento de nuevas medidas que ayuden a incrementar el uso y la eficiencia del transporte ferroviario, así como su combinación con el transporte por carretera.



Ante esta necesidad impulsada desde la Comisión Europea y desde el Ministerio de Fomento español, el presente proyecto fin de carrera se centra en estudiar ciertas terminales de transporte intermodal con el objetivo de analizar y mejorar su funcionamiento.

Capítulo 3.- Simulación de eventos discretos con Witness

La función de este capítulo es explicar lo que se entiende por simulación, junto a los motivos y las razones de su utilización para el estudio de terminales de transporte intermodal. Además también se definen las etapas que componen un estudio de simulación, y se presenta el software Witness que es la herramienta que se ha utilizado para la programación del modelo de simulación de este proyecto.

3.1 Introducción a la simulación de eventos discretos

La simulación se puede definir como el acto de imitar un sistema real, de forma que se representen ciertas características o comportamientos claves del mismo [Vatic group, 2013].

Una definición más académica es la dada por Robert Shannon en su obra "Systems Simulation: The Art and Science" publicada en 1976. En este caso, la simulación se define como : " el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a término experiencias con él, con la finalidad de comprender el comportamiento del sistema o evaluar nuevas estrategias, dentro de los límites impuestos por un cierto criterio o un conjunto de ellos, para el funcionamiento del sistema" [Shannon, R. 1976].

De forma alternativa, se puede decir que la simulación es una herramienta que permite simular el funcionamiento de un sistema para analizar su comportamiento. La simulación es una poderosa técnica que permite crear un escenario donde representar informáticamente determinadas situaciones que por sus características (peligrosas, que requieren grandes cantidades de dinero, gran cantidad de personal, de herramientas, etc.) no es conveniente implementarlas de partida en un sistema real y poder predecir su comportamiento en una situación real.

Según estas variables de estado, que son las que “conforman el conjunto mínimo de variables internas del sistema necesarias para describir completamente su estado interno”, los tipos de simulación son [Instituto de Investigación Tecnológica, 2013]:

- Continuos: si todas las variables de estado cambian de forma continua con el tiempo
- Discretos: si todas las variables de estado cambian en determinados instantes de tiempo
- Híbridos o combinados: si incluyen variables de estado continuas y discretas

La simulación de eventos discretos es una técnica que soporta de forma robusta la toma de decisiones en el diseño y en la planificación de las actividades industriales. Entre sus ventajas podemos indicar: inclusión de efectos aleatorios dentro del análisis, tener en cuenta los efectos de interacciones complejas en el sistema, y su uso como herramienta de previsión para el análisis de riesgo de diferentes alternativas o para encontrar consenso entre diferentes conceptos de opinión.

La simulación por eventos discretos se puede definir como una técnica informática de modelado dinámico de sistemas, que se caracteriza por un control en la variable del tiempo que permite avanzar a éste a intervalos variables, en función de la planificación de ocurrencia de tales eventos a un tiempo futuro. Un requisito para aplicar esta técnica es que las variables que definen el sistema no cambien su comportamiento entre eventos.

El ámbito de aplicación de la simulación es enorme y en gran variedad de áreas, desde servicios públicos a procesos industriales, desde análisis de transporte a formación de personal de centrales nucleares, planes de producción de productos, sistemas de comunicación, análisis financieros y militares. Se utiliza tanto en la etapa de diseño y desarrollo, como en el análisis de procesos ya

consolidados para su mejora, analizando el impacto que puede provocar la inclusión de aspectos o modificaciones y para evaluar la conveniencia de su implantación.

Además de por las causas ya comentadas, la simulación es una técnica experimental de resolución de problemas que podemos usar cuando [Universidad Autónoma de Madrid, 2013]:

- Existe la necesidad de estudiar el pasado, presente y futuro de un sistema en tiempo real, expandiendo o contrayendo el tiempo (control de sistemas en tiempo real, cámara lenta, crecimiento de poblaciones, efectos colaterales de fármacos, etc.)
- La modelación matemática del sistema es imposible
- Los modelos matemáticos carecen de soluciones analíticas o numéricas
- Cuando la precisión esperada por la simulación sea consistente con los requisitos de un problema concreto.

En este caso, cabe destacar que las aplicaciones y productos software así como la capacidad y rapidez de los procesadores actuales han contribuido de manera notable a que la simulación sea una herramienta cada vez más utilizada para el análisis de gran cantidad y variedad de procesos industriales.

3.2 Etapas de un estudio de simulación

La metodología que debe emplearse para realizar un estudio de simulación, como el que se recoge en este proyecto, consta de las siguientes etapas [Law y Kelton, 2000]:

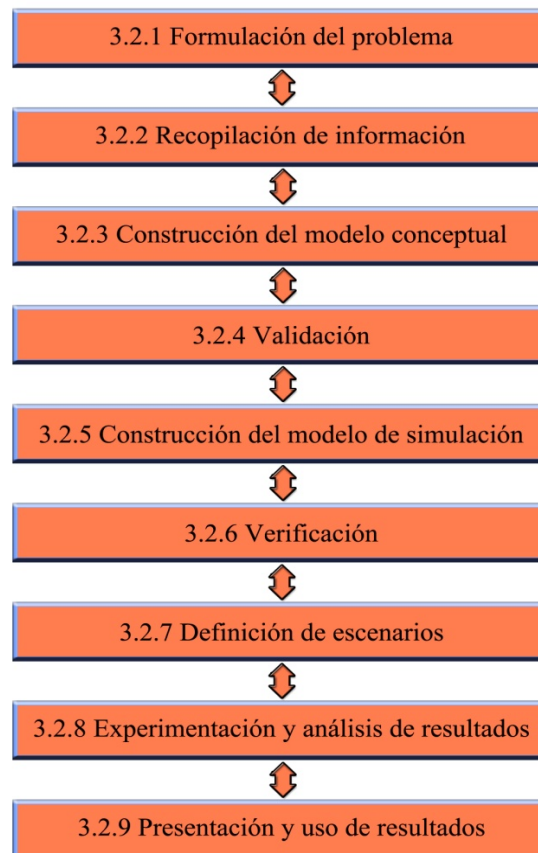


Figura 3.1 Etapas de un estudio de simulación

Fuente: *Elaboración propia*

3.2.1 Formulación del problema

En esta etapa se debe definir el problema que se desea estudiar, hacer un análisis previo que determine las relaciones entre los elementos del sistema, las restricciones que presenta, las variables que intervienen, los puntos de verificación a controlar, los resultados que se esperan obtener del estudio de simulación, los recursos que se deben utilizar para llevarlo a cabo y su duración.

3.2.2 Recopilación de información

Esta etapa es fundamental pues los datos recopilados y su precisión determinan la exactitud de la representación del sistema respecto a los objetivos

de estudio. Además, de ellos dependen muchos aspectos conceptuales del modelo. También es en esta etapa donde, si es posible, se recogen datos reales para poder determinar más fielmente ciertos parámetros del modelo como las distribuciones de probabilidad empleadas para generar datos en el modelo. Para realizar este propósito las series históricas aportan una información muy útil al igual que los estudios de campo.

3.2.3 Construcción del modelo conceptual

La construcción del modelo conceptual no es una tarea fácil. Con los datos que se tienen de la etapa 3.2.2 se debe precisar el funcionamiento del sistema. Este debe representarse de la forma más fiel posible a la realidad, teniendo en cuenta el nivel de precisión definido en la etapa 3.1.1, pues el superarlo puede suponer un coste excesivo, además de no proporcionar mejoras significativas en los resultados finales.

Las variables de entrada, las variables de salida y los parámetros a usar en el diseño son también elementos que se definen en esta etapa.

3.2.4 Validación

La validación del modelo conceptual pretende determinar si hay una similitud entre el sistema real y el modelado. Las hipótesis que se hacen al construir el modelo conceptual se comprueban observando si este modelo tiene un comportamiento parecido al del sistema real. La dificultad de esta etapa aumenta si el sistema real con el que se quiere comparar el modelo conceptual no existe.

Aunque no aparezca recogido en la figura 3.1, también se realizan tareas de validación después de la etapa 3.2.6, donde se comprueba si los datos obtenidos del modelo de simulación son similares a los del sistema real. Estas comparaciones permiten ajustar y calibrar el modelo de simulación.



3.2.5 Construcción del modelo de simulación

Una vez que ya se han realizado las etapas anteriores es posible la construcción del modelo informático. En este punto se debe elegir entre programar el modelo en un lenguaje de programación del tipo de C++, FORTRAN, etc. que son lenguajes estándar, económicamente asequibles, rápidos en la ejecución aunque no tanto en su programación, o bien usar otro tipo de software, como por ejemplo, un lenguaje de simulación que al estar orientado a un uso concreto, tiene características que facilitan la programación e incorporan herramientas de comprobación, además de: un entorno gráfico, módulos de informes que muestran de una forma más visual el funcionamiento del proceso estudiado, etc. Estos últimos software son más costosos que los primeros y requieren de equipos informáticos más avanzados y con más prestaciones.

3.2.6 Verificación

La verificación consiste en analizar y contrastar que lo programado en el modelo es correcto. En este caso, para simplificar pueden analizarse primero los procesos simples y posteriormente los demás de acuerdo a su grado de complejidad. Se comprueba también que las interrelaciones entre los procesos son las correctas y que no provocan funcionamientos indebidos. Se verifica además que el modelo se ejecuta tal como se habían estimado y que los distintos procesos se interrelacionan de la forma esperada sin provocar inconsistencias ni incidencias.

Ciertos softwares disponen de ciertas utilidades que facilitan la comprobación y evaluación del código programado.

3.2.7 Definición de escenarios

Antes de experimentar con el modelo de simulación es imprescindible proyectar unos escenarios y determinar los datos, parámetros y variables que se

precisan para su simulación. Los escenarios deben reproducir las situaciones y circunstancias posibles o reales del sistema a simular teniendo en cuenta las características y peculiaridades del mismo.

3.2.8 Experimentación y análisis de resultados

Si se está trabajando con datos de entrada aleatorios, para llegar a conclusiones y poder tomar decisiones a partir de los resultados del modelo, es necesario realizar varias simulaciones. El número y la forma de llevarlas a cabo deben ajustarse a un plan de pruebas predefinido.

3.2.9 Presentación y uso de resultados

Una vez que se tienen los datos de las simulaciones convenientemente organizados y ordenados se analizan para sacar las conclusiones que correspondan. Estas conclusiones deben ratificar la estrategia adoptada tanto del modelo de simulación como del plan de pruebas y definirán las acciones que se deben afrontar en el sistema que se analiza.

3.3 Entorno de simulación Witness

WITNESS es una herramienta informática creada específicamente para simular sistemas productivos, aunque también puede ser utilizada para simular otros sistemas relacionados, por ejemplo, con una red de transporte.

La aplicación WITNESS [Universidad de Sevilla, 2013]:

- Permite modelar y simular sistemas dinámicos con eventos discretos
- Los eventos aleatorios se pueden modelar mediante distribuciones probabilísticas estándar

- Tiene herramientas para el análisis de los resultados generados en las simulaciones
- Incorpora la representación de la información y del estado del proceso de una manera muy visual, de forma que se facilita la comprensión del funcionamiento del sistema modelado así como la extracción de conclusiones a partir de las simulaciones realizadas

Además de las ventajas anteriormente comentadas Witness presenta las siguientes para la construcción de modelos. [MCOII, 2011]:

- Facilidad de programación, dispone de elementos parametrizables que representan los elementos del sistema real y son la base sobre los que se soporta el modelo
- Flexibilidad de programación, ya que Witness permite definir nuevos objetos a partir de los objetos parametrizables mencionados en el punto anterior
- Estructura modular, que facilita la agrupación de elementos del modelo y su fragmentación en partes independientes y su integración en unidades con naturaleza propia
- Facilidades para la verificación que permiten la ejecución paso a paso, avanzar y parar la simulación en cualquier instante para detectar errores

Como se ha comentado anteriormente, Witness dispone de elementos parametrizables para construir los modelos de simulación. Estos elementos pueden estructurarse en 3 bloques:

- Elementos físicos, destinados a representar las entidades físicas del sistema real, tales como máquinas, almacenes, vehículos de transporte, unidades de

producto, etc. Los elementos de Witness, utilizados en este proyecto, que los representan son, entre otros:

- PART, entidades reales que avanzan a través del sistema y que serán sometidas a diversas operaciones.
 - MACHINE, realizan operaciones sobre los PARTS.
 - BUFFER, sistemas de espera que almacenan PARTS.
 - PATH, recorridos que hacen los PARTS entre elementos del modelo.
 - LABOR representan recursos materiales o personales y que limitan, por ejemplo, la utilización de un elemento MACHINE.
-
- Elementos lógicos, necesarios para el desarrollo del modelo, tales como variables, funciones, distribuciones, turnos de trabajo, etc. Los elementos de Witness, utilizados en este proyecto, que están relacionados con ellos son:
 - VARIABLE. Almacenan datos necesarios para la programación y el funcionamiento del modelo. Son de diferentes tipos dependiendo de la naturaleza del dato que almacena (entero, real, cadena de caracteres, etc.). Pueden almacenar un único valor o una matriz de valores.
 - FUNCTION. Permite definir subrutinas que complementan o controlan a los demás elementos. Witness tiene una amplia librería con funciones ya programadas y permite al usuario definir las suyas propias.
 - DISTRIBUTION. Generan variables aleatorias mediante las distribuciones teóricas más comunes (exponencial, normal, etc.).
 - SHIFT, permite asignar turnos de trabajo a otros elementos como MACHINE o LABOR.

 - Elementos gráficos, que facilitan la visualización del funcionamiento de la simulación y enfatizan los datos más destacados de los procesos. Los elementos gráficos disponibles en Witness son [Universidad de Valladolid, 2013]:
 - TIMESERIE. Recoge la variación de algún parámetro o variable a lo largo del tiempo de simulación, tomando muestras cada cierto tiempo.

- HISTOGRAMA. Registra y proporciona información sobre el modelo. No existe ningún intervalo de muestreo, las expresiones se registran cuando así lo ordena alguna acción, tomando nota del valor y frecuencia de aparición de algún parámetro o expresión.

Los elementos de Witness pueden clasificarse de forma alternativa en otros tres grupos:

- Elementos de simulación, que son los que se indican en la ventana de simulación (a la derecha de la figura 3.2). Pueden estar agrupados en módulos, y estos pueden agrupar submódulos. Estos elementos, módulos y submódulos se muestran en el árbol de elementos (a la izquierda de la figura 3.2)

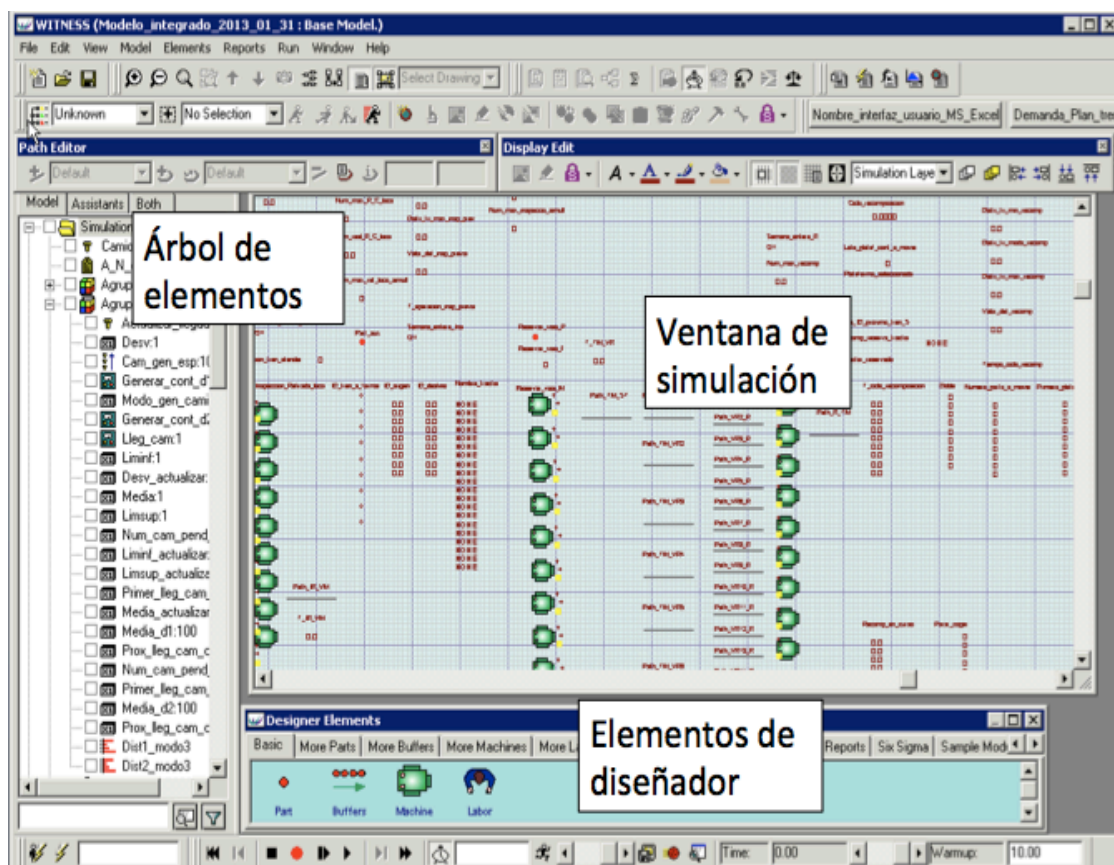


Figura 3.2 Árbol de elementos, ventana de simulación y elementos de diseñador

Fuente: *Elaboración propia*

- Elementos de diseñador (véase la parte inferior de la figura 3.2), están agrupados en unos formularios en forma de plantillas de elementos predefinidos, que sirven de herramienta para definir de forma sencilla y rápida los elementos de simulación. Estos elementos son parametrizables para que tengan las características adecuadas para representar el sistema a simular
- Elementos del sistema, que simbolizan o representan variables y lugares del sistema, entre ellos se encuentra la variable TIME (variable real que contiene el tiempo actual de simulación y el lugar WORLD (elemento que determina el lugar físico de donde pueden salir los elementos PART utilizados en la simulación)

La creación de modelos en Witness consta principalmente de tres pasos: Define, Detail y Display.

En primer lugar se crean y definen (Define) los elementos de los que constará el modelo de simulación, cogiendo elementos de diseñador y llevándolos a la ventana de simulación.

A continuación se detallan (Detail) todas las características de cada elemento, las reglas lógicas que permiten su interacción con los demás elementos (reglas de entrada y salida, por ejemplo) y las acciones que deben simularse cuando se produce un hecho determinado en el elemento (Actions). La figura 3.3 muestra un ejemplo de los aspectos que se pueden detallar para un elemento MACHINE. Se puede dar, por ejemplo, nombre a la maquina, la cantidad, el tiempo de ciclo, reglas de entrada y salida o acciones a realizar a la entrada o a la salida.

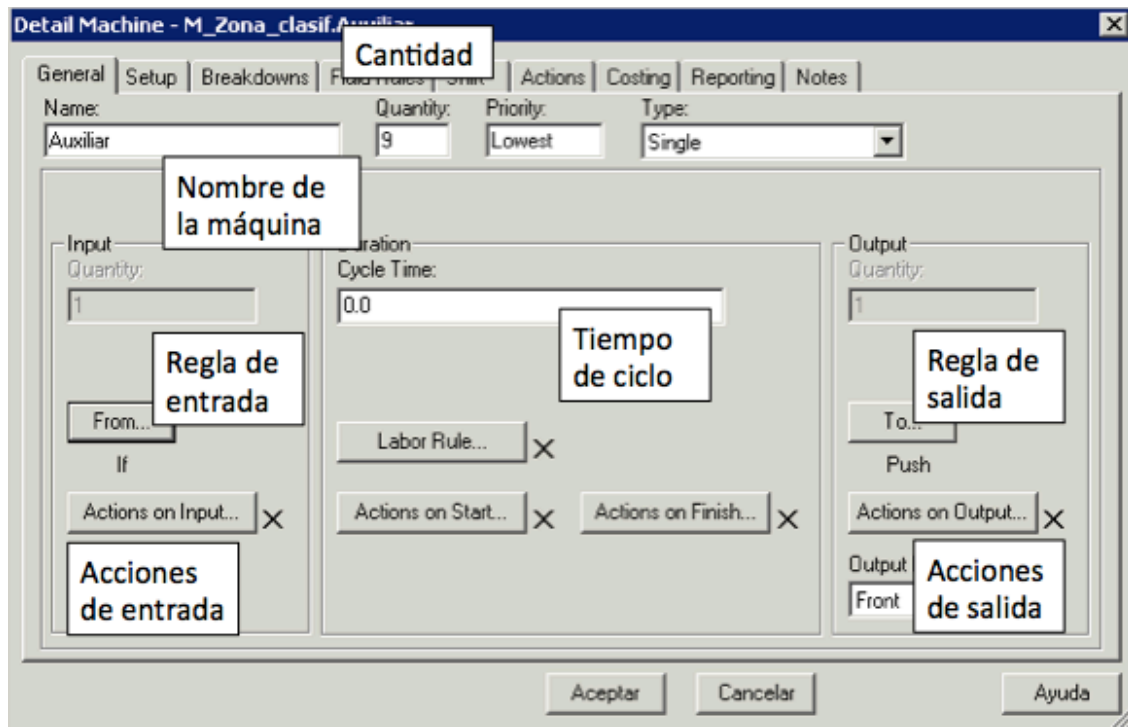


Figura 3.3 Pantalla del menú DETAIL de un elemento físico MACHINE

Fuente: *Elaboración propia*

Por último, puede modificarse la representación gráfica (Display) de cada elemento con el objetivo de que sea más intuitiva y fácil de comprender. No es imprescindible, pero sí recomendable para obtener una apariencia similar a la del sistema a simular y facilitar la detección de errores durante la etapa de verificación comentada en el apartado 3.2.

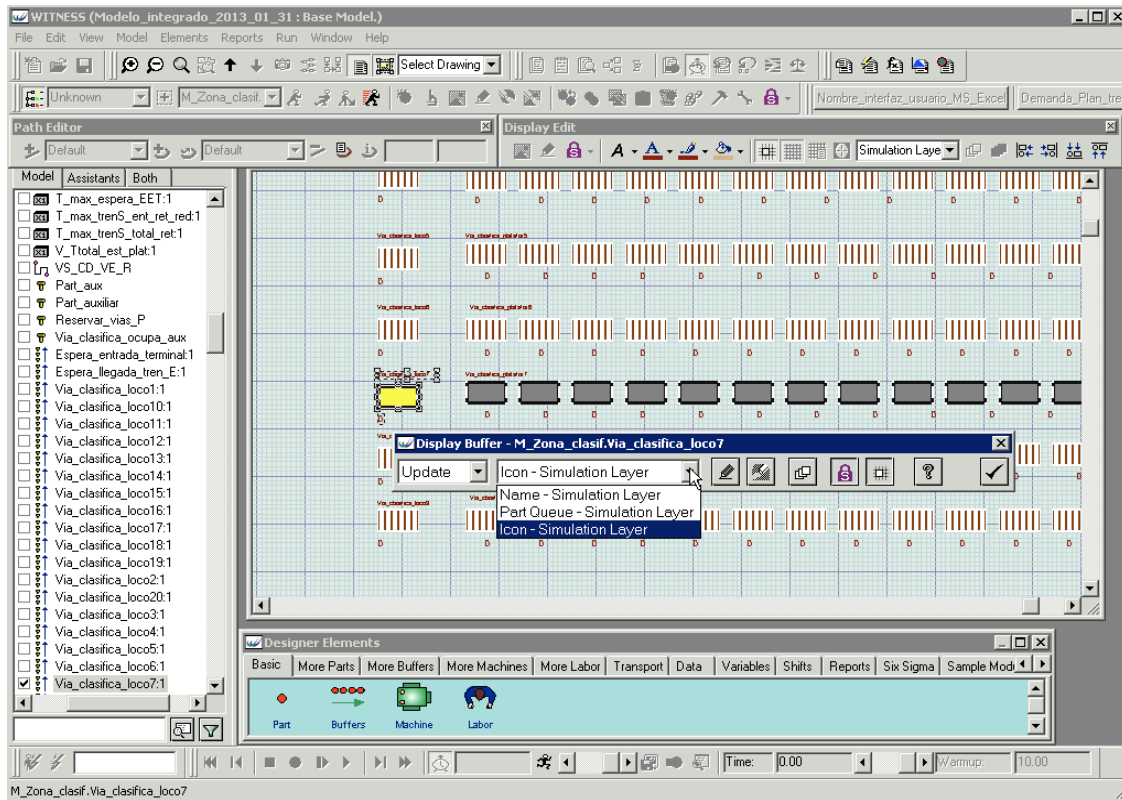


Figura 3.4 Pantalla del menú DISPLAY un elemento físico MACHINE

Fuente: *Elaboración propia*

Cabe destacar que estas 3 fases no suelen desarrollarse secuencialmente, sino que se va pasando de una a otra según se va avanzando con la construcción del modelo. A veces habrá que modificar elementos, ya que el proceso de modelización tiene una constante retroalimentación.

3.4 Uso de Witness para simular una terminal de transporte intermodal

Es bastante improbable que una terminal de transporte intermodal pueda parar su actividad para dedicarse a hacer diferentes pruebas para mejorar su funcionamiento (por ejemplo, ante una situación de baja demanda, probar in situ que pasaría si se quita una grúa, puede afectar al nivel de servicio de la terminal). De esta forma se justifica el uso de modelos para prever el efecto de estos cambios antes de su implementación en el sistema real.

El gran número de elementos, interrelaciones y variables aleatorias a las que está sometida una terminal hacen que sea adecuado aplicar simulación, en lugar de modelos analíticos para el estudio de su funcionamiento.

El tipo de simulación utilizado corresponde con una simulación por eventos discretos, ya que tanto los contenedores, las plataformas, las locomotoras, etc. son tratados de forma unitaria y su estado evoluciona de forma discreta en el tiempo.

Como se ha comentado en el apartado 3.1, la simulación requiere del uso de ordenadores. En este caso, los entornos de simulación como Witness (software elegido en este proyecto fin de carrera para implementar el modelo de simulación presentado en el capítulo 5), están evolucionando de forma que cada vez es más fácil usarlos. El número creciente de librerías y el nivel de integración que se está alcanzando, por ejemplo, con hojas de cálculo, facilita el uso y la modificación posterior del modelo creado.

Capítulo 4.- Estudio de terminales ferroviarias de contenedores

En este capítulo, se detallan varios elementos. Primeramente, el sistema a analizar: una terminal de transporte intermodal con zona de clasificación. A continuación, se explican todos los recursos, las infraestructuras y el parque móvil de estas terminales ferroviarias. Después, se definen los procesos de la terminal, haciendo especial hincapié en el plan de trenes de la terminal ya que es el eje de todo sistema intermodal. Por último, se nombran y describen los recursos y procesos de la zona de carga/descarga con grúas móviles, ya que esa zona puede trabajar de forma conjunta con la zona de clasificación estudiada en este proyecto.

4.1. Sistema a analizar

Las terminales ferroviarias que forman parte de este estudio son las de transporte intermodal. Éstas se pueden definir como el conjunto de infraestructuras e instalaciones mediante las cuales se gestiona el tráfico de trenes, el transbordo de mercancías entre modos de transporte, el almacenamiento de la carga, la clasificación de ésta y otras operaciones asociadas a estos procesos. Además, las características específicas de una terminal de transporte intermodal hacen que también sea un sistema integrado con conexión física y de información con las redes de transporte que se combinan en ella.

Se pueden utilizar diversos criterios a la hora de clasificar las terminales ferroviarias.

- Su localización

Dependiendo de la ubicación de la terminal, ésta puede ser interior y por tanto estar dentro de una red ferroviaria; de frontera entre dos redes ferroviarias; terminales en puertos fluviales y marítimos, o un puerto seco.

Esta última es una terminal conectada con una o varias terminales marítimas que permite que el control aduanero se haga directamente en la terminal interior para, de esta forma, descongestionar las terminales marítimas y agilizar la entrada y salida de la carga. Ejemplos de las terminales descritas pueden ser Madrid Abroñigal como terminal interior, Portbou como terminal de frontera o la terminal de Coslada (Madrid) como puerto seco.

- Los medios de transporte que combinan
Existen terminales que permiten el intercambio de carga tren-tren, tren-carretera, tren-barco o una combinación de ellos.
- La carga que manipulan
Hay terminales dedicadas a la manipulación de contenedores, al transporte de automóviles, minerales, productos petroquímicos, etc.
- Los equipos que se utilizan para manipular la carga
Se pueden clasificar en terminales operadas por grúas móviles, por grúas móviles y grúas pórtico, etc.
- Zonas de las que están compuestas
Hay terminales compuestas por una zona de carga y descarga, otras compuestas por una zona de carga y descarga y una zona de clasificación, etc.

Dentro de esta gran variedad de terminales de transporte intermodal, se encuentran las terminales en las que está centrado este proyecto: terminales de transporte intermodal que intercambian contenedores entre tren-tren en una zona de clasificación, combinada o no con una zona de carga y descarga operada por grúas móviles.

Estas terminales son muy frecuentes en distintos países. Sin embargo el sistema de estudio elegido para este proyecto ha sido la red ferroviaria española ya que se buscaban unos resultados aplicables a un sistema real y el sistema español es el más cercano.

Para centrar este proyecto dentro de la red ferroviaria española, se ha hecho un estudio de las terminales que componen esta red a partir de la información publicada en la página web de ADIF, empresa que se encarga, entre otras funciones, de administrar las infraestructuras ferroviarias públicas. Dentro de dicho estudio, se han analizado 228 terminales del sistema ferroviario español que se dedican a la manipulación de mercancías, hay unas que solo transportan contenedores y otras que transportan otras mercancías. A partir de este estudio, se han identificado que las terminales consideradas como objeto de estudio difieren, entre otros aspectos, en las funciones que desempeñan dentro de la red. En este punto, se han identificado dos grandes tipos de terminales. Por un lado, las que se encargan de intercambiar contenedores entre modos de transporte y por otro lado, las que además de realizar esta función actúan como Hub (punto de intercambio o centro de distribución de mercancías).

A su vez, las funciones de estos dos tipos de terminales aparecen representadas en la figura 4.1

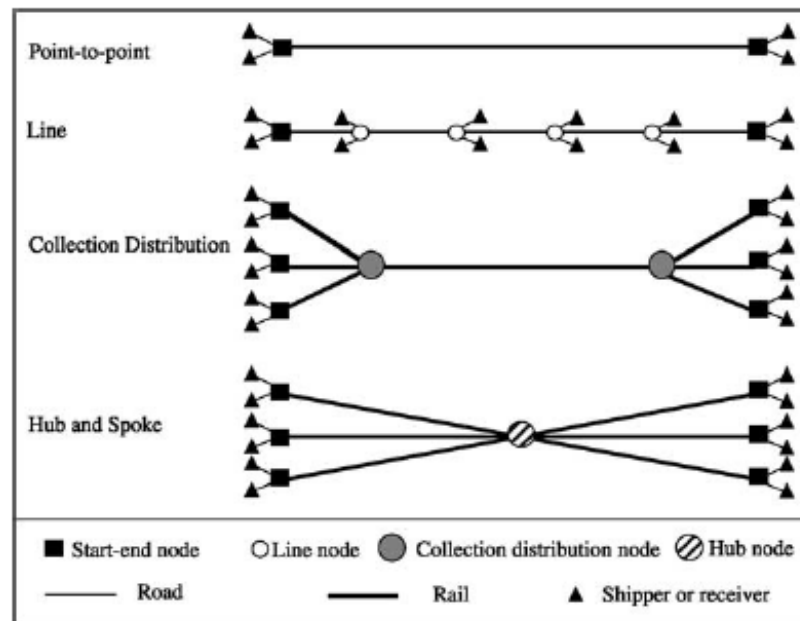


Figura 4.1 Cuatro redes básicas de transporte

Fuente: *Macharis, C y Bontekoning, Y.M.*

El primer tipo de terminales (aquellas que se encargan de intercambiar contenedores entre modos de transporte, representadas como point-to-point en la figura 4.1) ha sido ya estudiada y analizada otros alumnos de la universidad Carlos III en sus Proyectos Fin de Carrera (Cedrón Domínguez, 2011, y Jiménez Treitas, 2011). El primero se encargó de analizar las terminales atendidas por grúas móviles y pórtico y el segundo se ocupó de estudiar las terminales operadas sólo por grúas móviles. Este tipo de terminales se encuentran distribuidas por toda la geografía española.

El segundo tipo de terminales, que se encarga de las funciones “line”, “Collection Distribution” y “Hub and Spoke” representadas en la figura 4.1, es el tema de estudio del proyecto aquí presente. En este proyecto estas funciones pueden darse de forma aislada o combinada con el intercambio de contenedores entre modos, siendo las grúas móviles las encargadas de realizar este intercambio. En España, el porcentaje de terminales con zona de clasificación es del 42,11%, de ahí la importancia de su estudio.

Las zonas de clasificación se pueden clasificar en tres tipos [Marinov, M. y Viegas, J., 2009] :

- Playas de maniobras sin desnivel. Son aquellas en las que la vías tienen un cuello de derivación en uno, o en ambos extremos donde las plataformas son movidas por un tractor de maniobras
- Playas de maniobras de lomo de asno. Son aquellas en las que hay una o dos vías sobre una colina artificial donde los vagones clasificados son lanzados por su propia gravedad y eventualmente con regulación de la velocidad por medio de frenos de vías al pie del lomo de asno
- Playas de maniobras de gravedad. Similares a las de lomo de asno pero con la diferencia de que toda la playa se encuentra en desnivel por lo que el uso de tractores de maniobras es menos necesario.

Este proyecto se centra en el estudio del primer tipo de zona de clasificación ya que es el que presenta el sistema ferroviario español.

En los siguientes apartados se encuentra el estudio del diseño y la operación de estas terminales como paso previo a la implementación informática del modelo de simulación flexible. En los apartados 4.2 y 4.3 se proporcionará información sobre los recursos, infraestructuras, parque móvil y operaciones que se emplean en la zona de clasificación. En el apartado 4.4, se resume el diseño y la operación de la zona de carga/descarga atendida por grúas móviles.

En estas terminales con zona de clasificación se produce el intercambio de contenedores cuyo próximo modo de transporte sigue siendo el transporte vía tren. Los trenes, una vez recompuestos, pueden ser dirigidos a otra zona de la terminal, como es la zona de carga y descarga o a otra terminal de la red española.

4.2. Zona de clasificación de una terminal ferroviaria

Los elementos que componen una terminal de transporte intermodal pueden, y en particular su zona de clasificación, dividirse en dos grandes grupos.

- Recursos e infraestructuras: Grúas, vías de carga y descarga, vías de clasificación, playas de almacenamiento, etc.
- Parque móvil: contenedores, plataformas de los trenes, locomotoras, elementos de transporte, etc.

4.2.1 Recursos e infraestructuras presentes en la zona de clasificación

La zona de clasificación de una terminal de transporte intermodal tiene unos recursos e infraestructuras específicos para poder realizar unas operaciones específicas:

- Vías

Hay varios tipos de vías, según la utilización que se haga de ellas:

- Vía de entrada/recepción – vía de salida/expedición

Dichas vías conectan la red ferroviaria y la zona de clasificación de la terminal. Están electrificadas puesto que es el lugar donde los trenes que poseen locomotora eléctrica entran y salen de la terminal.

Hay dos posibilidades: una, que el elemento sea el mismo y haya una sola vía que funcione como vía de entrada y salida y que, por tanto, no se puedan realizar ambas operaciones a la vez y otra, que haya dos vías y funcione una para que los trenes entren y otra para que los trenes salgan.

- Vías de clasificación

Este tipo de vías tiene tres funciones:

- Es el lugar donde se retira o se coloca la locomotora que trae consigo el tren.
- Es el lugar donde se lleva a cabo la reorganización de las plataformas para clasificar los trenes en función de su destino. Es indiferente si los trenes vienen de la zona de carga y descarga de la propia terminal o si, por el contrario, vienen de otra terminal.
- También pueden ser utilizadas como zona de estacionamiento en caso de que el tren ya haya acabado de recomponerse y la hora de salida de dicho tren no sea hasta pasado un tiempo.

- Tractor de maniobras

Es una pequeña locomotora ferroviaria la cual no está destinada a mover trenes por largas distancias, sino para armar trenes que luego serán arrastrados por las locomotoras principales, desarmar un tren recientemente ingresado, y realizar movimientos de vagones en general, en un proceso conocido como maniobras

4.2.2 Parque móvil

El parque móvil corresponde con las locomotoras de los trenes, así como con los vagones y aquellos contenedores que los trenes transportan.

- Contenedores

Albergan las mercancías transportadas. Una parte son propiedad de los operadores de la red (RENFE, Comsa, etc.), mientras que el resto pertenecen a los propios clientes finales. El ancho de los contenedores suele ser de 8 pies, y el alto varía entre 8 y 9 pies. Existen contenedores de diversos tamaños, aunque los más utilizados son los de 20, 30 y 40 pies de

longitud. Sin embargo, en el mercado existen contenedores de 10, 45 o 53 pies, además de otros con medidas especiales que no siguen ningún estándar.

- Locomotora

Dependiendo de su fuente de energía, las locomotoras pueden ser eléctricas o de diesel. Si son eléctricas, necesitan que la vía tenga catenaria, en este caso los costes de mantenimiento son menores, así como su contaminación frente a las diesel.

- Vagones

En el ámbito del transporte intermodal, se llaman plataformas puesto que transportan los contenedores. Hay diferentes tamaños, pero los más utilizados son los de 60 pies por su versatilidad, pueden transportar contenedores de 20, 30 ó 40 pies combinándolos de diferentes maneras.

- Recursos humanos

Empleados, entre otras tareas, para gestionar la entrada/salida de trenes y conducir los tractores de maniobra.

4.3. Procesos presentes en la zona de clasificación

A continuación, se definen los distintos procesos que se llevan a cabo en la terminal ferroviaria. En primer lugar, se detalla el plan de trenes y después, los procesos de la terminal asociados a él.

Hay que clarificar que los diferentes procesos no tienen por qué formar parte de todas las terminales. Pueden estar todos o algunos de ellos. De esta forma se quiere hacer notar que el sistema de estudio no es único.

4.3.1 Plan de trenes

El plan de trenes establece la relación entre los trenes entrantes y salientes a los que da servicio la terminal. La información que se indica en el plan de trenes es, además de la relación entre los trenes que entran y salen de la terminal, los horarios de entrada y salida, el número y tipo de contenedores que lleva cada tren y la información acerca de los clientes a los que pertenecen los contenedores que lleva. Toda esta información es necesaria para poder organizar la logística de la terminal y de esta forma proporcionar el mejor servicio posible evitando pérdidas o retrasos en las entregas de los contenedores.

En el sistema español, las plataformas de un tren vienen siempre ordenadas de forma que todas las plataformas que vayan a un destino determinado estén equipadas en un mismo bloque. Por ejemplo, si hay 5 plataformas que van con destino a Madrid y cinco que van a Barcelona, irán primero las cinco plataformas de Madrid y luego las cinco de Barcelona o viceversa, pero nunca intercaladas. (Véase la figura 4.2).



Figura 4.2 Orden de plataformas con diferentes destinos

Fuente: *elaboración propia*

Las terminales españolas trabajan con dos tipos de trenes, cliente y multicliente. Estos trenes son propiedad de diferentes operadores de la red de transporte intermodal como, por ejemplo, RENFE Operadora, Continental Rail, Comsa Rail Transport, Eurocargo o Logitren. Los trenes cliente son el servicio de transporte ferroviario de contenedores diseñado y desarrollado de acuerdo a las exigencias del cliente. El cliente puede parametrizar tanto el origen y el destino como el volumen y la frecuencia de los envíos. Este servicio solo se comercializa para trenes completos, con viajes de ida y vuelta, tanto en el ámbito nacional como internacional. Por el contrario, los trenes multicliente son aquellos que transportan contenedores de varios clientes diferentes bajo unos horarios, orígenes y destinos impuestos por los operadores de la red. La composición de este tipo de trenes depende de la demanda que exista en cada momento por lo que el número de contenedores transportado de cada cliente varía en función de la cantidad de carga que cada uno de ellos tenga que enviar en ese momento.

Un matiz a destacar del transporte de mercancías por ferrocarril es el hecho de que los trenes de pasajeros tienen prioridad sobre los trenes que transportan mercancías y, como comparten vías, estos últimos se ven perjudicados. Por ello, es normal que gran parte de los trenes de mercancías a descargar lleguen a última hora de la noche o a primera hora de la mañana, mientras que los trenes de mercancías a cargar salgan a última hora de la tarde o por la noche. Estos horarios se deben a la gran cantidad de tráfico de pasajeros que existe por las mañanas y por las tardes, lo que reduce las posibilidades de que a esas horas se permita la salida o llegada de trenes de mercancías a las ciudades. Esta limitación de horas al día para las llegadas y las salidas de los trenes, origina picos de trabajo en las terminales.

4.3.2 Entrada de trenes en la zona de clasificación

Los trenes entran a la zona de clasificación por la vía de entrada y llegan a las vías de clasificación. Estos trenes pueden provenir de:

- Fuera de la terminal.

En este caso, se separa la locomotora eléctrica de la plataformas y ésta se envía a una vía donde espera hasta la salida del tren. A continuación, se utiliza un tractor de maniobras para clasificar las plataformas según su próximo destino

- La zona de carga/descarga

En este caso, las plataformas serán movidas por un tractor de maniobras desde la zona de carga/descarga a la zona de clasificación

Como se mencionó en el apartado 4.3.1, las plataformas vienen siempre ordenadas de forma que todas las que vayan a un destino determinado estén agrupadas en un mismo bloque.

4.3.3 Clasificación de las plataformas

Antes de clasificar las plataformas de un tren se inspecciona su contenido se inspecciona su contenido para verificar que el numero de plataformas transportadas y su destino es el correcto, así como la carga que debiera albergar cada uno de ellos.

Cuando la inspección termina, es cuando se realiza la clasificación propiamente dicha. Las plataformas se van colocando en la vía de clasificación asignada al tren de salida con el que están relacionadas, usando para ello un tractor de maniobras.

Parte de las plataformas de los trenes que llegan desde fuera de la terminal puede no tener por destino otra terminal sino la propia terminal considerada como objeto de estudio. El objetivo, en este caso, es mover esas plataformas desde la zona de clasificación a la zona de carga/descarga y allí, descargar esas plataformas, (los contenedores transportados en ellas saldrán posteriormente en camión)

volverlas a cargar con otros contenedores (que han entrado en la terminal previamente en camión) y enviarlas a la zona de clasificación de nuevo donde serán colocadas en el tren que corresponda para que la carga alcance su próximo destino. (Véase la figura 4.3).

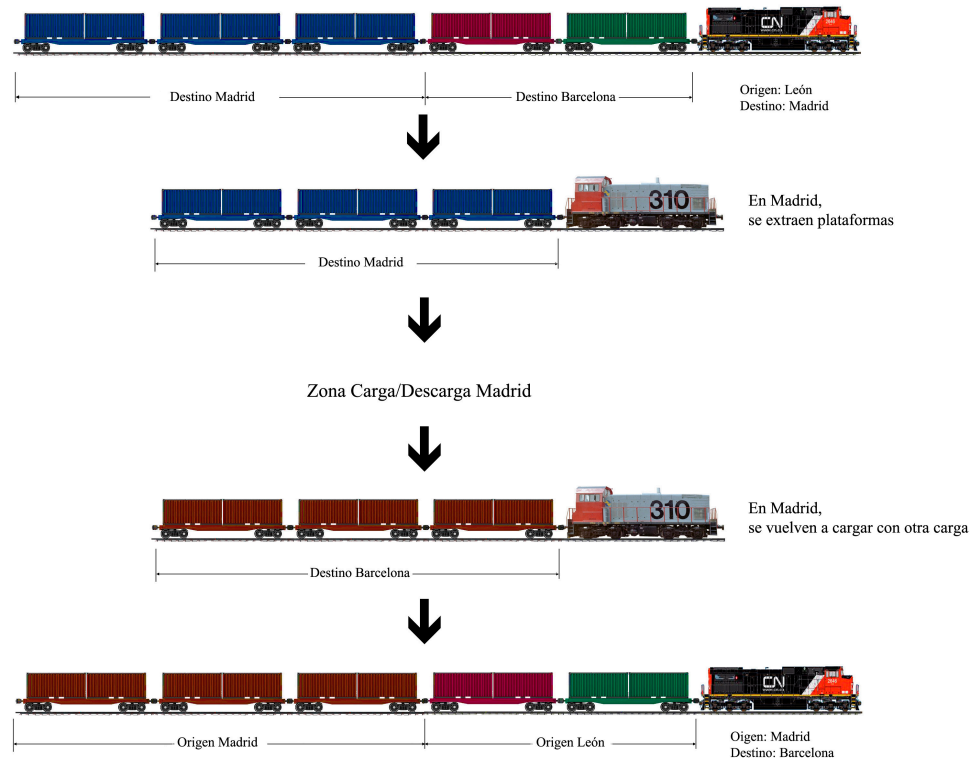


Figura 4.3 Plataformas con distintos destinos dentro de la terminal

Fuente: *Elaboración propia*

Si, al clasificar las plataformas, ya hubiese un grupo de plataformas impidiendo el paso de otras para colocarlas, primero se sacan las plataformas que impiden el paso, después se coloca el nuevo grupo de plataformas en su lugar correspondiente y por último se vuelven a colocar las plataformas que primeramente impedían el paso. De esta forma, el tiempo de clasificación de las plataformas aumenta. Estas dobles manipulaciones dependen de cómo están ordenadas las llegadas de los trenes en el plan (véase la figura 4.4 donde se indican estas operaciones).

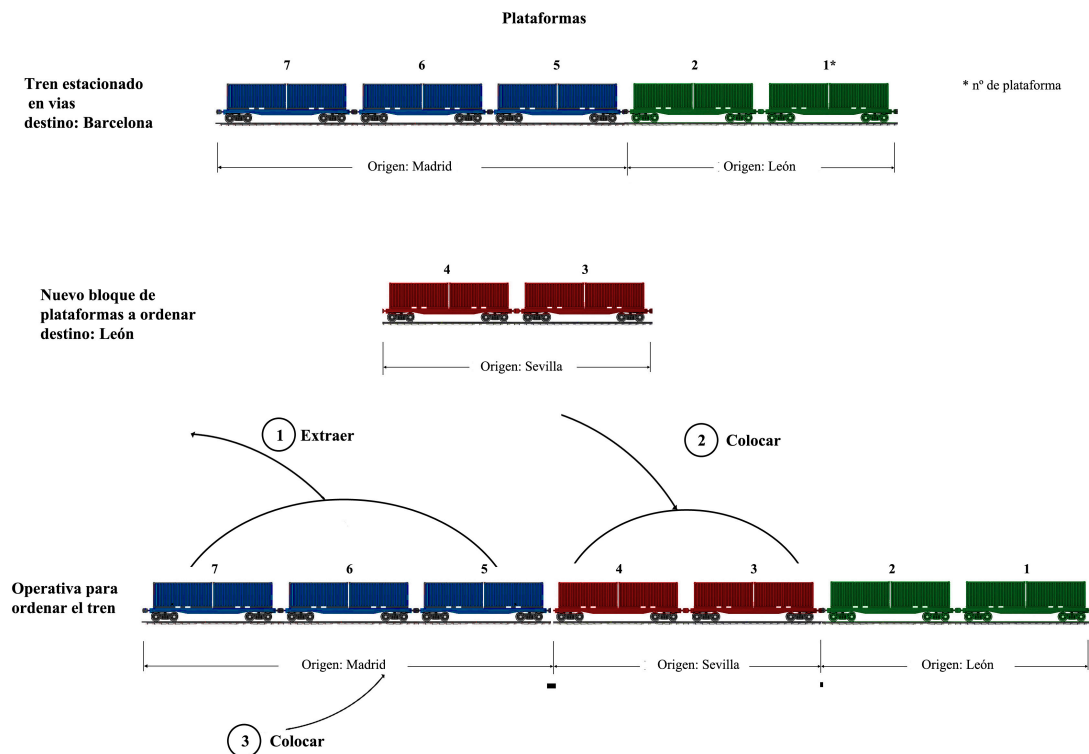


Figura 4.4 Ordenación de plataformas con distintos destinos dentro de la terminal

Fuente: *Elaboración propia*

4.3.4 Salida de trenes en la zona de clasificación

Una vez que todas las plataformas del tren saliente están colocadas según indica el plan de trenes, se vuelve a colocar la locomotora que lo introdujo en la terminal y el tren espera a que sea la hora para salir hacia su siguiente destino.

4.4. Resumen de la zona Carga/Descarga con grúas móviles

A continuación, se resumen los recursos, las infraestructuras y los procesos indicados en el Proyecto Fin de Carrera de Jesús Jiménez Treitas, [2011]. Como se ha mencionado con anterioridad, el presente proyecto fin de carrera estudia

terminales que solo poseen zona de clasificación o terminales que contengan esta zona con una de carga/descarga operada por grúas móviles.

4.4.1 Recursos e infraestructuras

- Vías de entrada y salida

Se encuentran a la cabecera de las vías de recepción/expedición y se emplean para dar entrada y salida a los trenes. Al igual que en la zona de clasificación, hay dos posibilidades: una, que el elemento sea el mismo y haya una sola vía que funcione como vía de entrada y salida y que, por tanto, no se puedan realizar ambas operaciones a la vez y otra, que haya dos vías y funcione una para los trenes entrantes y otra para los trenes salientes.

- Haz de vías de recepción y expedición.

Dichas vías conectan la red ferroviaria y la zona de carga/descarga de la terminal. Están electrificadas y es el lugar donde se retira la locomotora que trae consigo el tren. En este haz de vías es donde el tren espera antes de ser atendido en las vías de carga/descarga o para salir de ella.

- Vías de carga y descarga

En dichas vías, se lleva a cabo la transferencia de contenedores entre los diferentes elementos de la terminal: tren-camión, o tren-playa de almacenamiento.

- Líneas de circulación por la terminal

Son vías pavimentadas que se usan para que el intercambio modal se pueda llevar a cabo. Por ellas circulan camiones, tractores de terminal y grúas móviles.

Las terminales pueden tener una zona de aparcamiento donde los camiones, después de pasar por la puerta de entrada, pueden esperar el

momento en el que han de llevar a cabo su proceso de carga o descarga. Dicho proceso puede ser en la playa de almacenamiento o cerca de las vías.

- Grúas móviles

Se utilizan para mover contenedores dentro de la terminal, para cargar y descargar los contenedores de los trenes o camiones y para apilar dichos contenedores.

Son vehículos a motor que se pueden mover libremente por la terminal según sean necesarias. Disponen de un brazo articulado diseñado para mover y elevar los contenedores. El número de grúas depende del número de operaciones por hora que vaya a realizar la terminal. Las hay con un número elevado como puede ser Madrid-Abroñigal con seis o, en el lado opuesto, Córdoba con dos o León con una.



Figura 4.5 Grúa móvil

Fuente: *Grupo TCB [2012]*

- Superficie de almacenamiento de contenedores

Zona en la que los contenedores esperan a ser cargados en su siguiente modo de transporte. Estas playas de almacenamiento tienen varias maneras de organización, según el espacio del que disponga en la terminal, pero en general se organizan en tres dimensiones, filas x hileras x alturas.



Figura 4.6 Superficie de almacenamiento de contenedores

Fuente: *Estación mercancías León [2012]*

4.4.2 Procesos

4.4.2.1 Almacenamiento de contenedores

Si los contenedores no son directamente trasladados del camión al tren o viceversa, los contenedores deben almacenarse en una zona destinada específicamente a ello y de esta forma esperar al momento de ser cargado en un tren saliente.

Las necesidades de almacenamiento dependen principalmente del volumen de contenedores que se gestiona en la terminal y del número de movimientos directos entre modos distintos modos de transporte.

Las zonas de almacenamiento se organizan en filas e hileras según se describe en la siguiente figura:

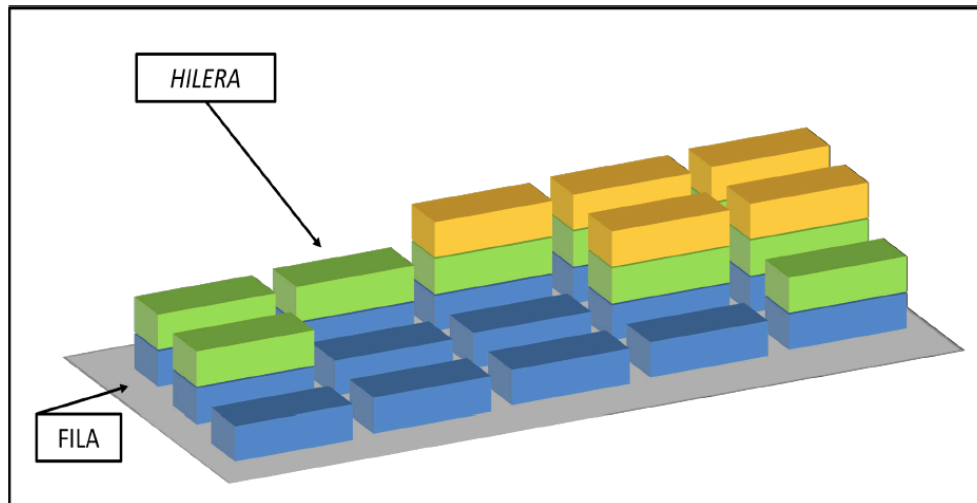


Figura 4.7 Representación de una playa de almacenamiento de contenedores

Fuente: *Jiménez Treitas*

Las playas de almacenamiento tienen diferentes formas de operar:

- Operación en superficie

Los contenedores primero se colocan hasta completar un nivel y cuando ese nivel está completo se coloca el siguiente. La ventaja de esta forma de operar es que se accede más rápido a los contenedores, pero se ocupa mucho más espacio que en la siguiente estrategia de operación, lo que puede llegar a ser un problema en terminales donde el espacio es limitado.

- Operación en altura

En esta forma de operar, las filas de cada hilera se han completado en altura. La ventaja de este modo de operar es la reducción de espacio ocupado en superficie que se obtiene. Sin embargo, se deben hacer más doble manipulaciones para acceder a uno de los contenedores que estén en las filas inferiores.

Los procesos que se llevan a cabo en relación con el almacenamiento de contenedores son los siguientes:

- Colocar/extraer contenedores de la zona de almacenamiento

Son operaciones realizadas por las grúas en las que, en la primera, se mueven los contenedores del tren/camión que los transportaba a la zona de almacenamiento. En la operación de extraer contenedores, el flujo es el inverso. Los contenedores pasan de la zona de almacenamiento al vehículo por el cual vayan a ser transportado fuera de la terminal.

- Dobles manipulaciones

Este tipo de operación aparece cuando es necesario extraer un contenedor que tiene encima otro que no se requiere. Primero, es necesario extraer el contenedor sobrante, coger el que se quiere y volver a colocar el contenedor que no era necesario en el hueco que ha quedado libre.

4.4.2.2. Carga y descarga de trenes

Una vez que los trenes han sido movidos a las vías de carga y descarga, es necesario invertir un tiempo en preparar las plataformas para su descarga, de forma que se liberen los anclajes contenedor-plataforma, quedando listos para su descarga. Después, se procede a la descarga de los contenedores de las plataformas, operación que realizan las grúas móviles.

Una vez que el tren ha sido descargado por completo a la zona de almacenamiento o a camiones, puede empezar la carga mediante grúa móvil. Aunque antes de empezar a cargar el tren, sus plataformas necesitan ser preparadas para albergar los contenedores que se les ha asignado. Esta preparación consiste en adaptar los sistemas de sujeción de las plataformas al número de contenedores que van a transportar, así como a la longitud de los mismos.

El momento en que el tren empieza a cargarse dependerá de la manera de operar de la terminal. Por un lado, se puede empezar a cargar el tren tan pronto como sea posible, mientras que, por otro lado, se puede fijar un instante de tiempo en el que empezará a cargarse. Este instante corresponde con una antelación fija a la hora programada de salida del tren. Esta última técnica consigue un mayor aprovechamiento de los recursos de la terminal, puesto que se pueden estar usando para otros procesos antes de que comience el proceso de carga. Por contra, exige un mayor esfuerzo en la planificación del trabajo y una incidencia en una operación puede que desencadene toda una serie de retrasos en las siguientes operaciones programadas.

Una vez se hayan colocado todos los contenedores en el tren, se requiere, primero, un proceso de inspección de la carga y, a continuación, el cierre de los sistemas de seguridad de las plataformas impidiendo que los contenedores caigan como consecuencia de algún movimiento fortuito. Tras esto, el tractor de maniobras mueve las plataformas desde la vía de carga y descarga a las vías de recepción/expedición, donde se acopla la locomotora eléctrica (o diesel) a las plataformas. El tren esperará en estas vías a que llegue el instante de tiempo en el que está programada su salida, y entonces abandonará la terminal por la vía de salida.

Cuando los trenes a descargar provienen de la zona de clasificación entran a las vías de carga/descarga utilizando un tractor de maniobras sin pasar previamente por las vías de recepción/expedición. Si una vez que se ha cargado el tren, éste se dirige hacia la otra zona de clasificación terminal, saldrá también tirado por un tractor de maniobras sin pasar previamente por las vías de recepción/expedición



4.4.2.3 Entrada, salida, carga y descarga de camiones

La infraestructura que regula la entrada y salida de vehículos de la terminal puede operar de dos formas:

- La puerta de entrada y la de salida son independientes: las puertas pueden estar alejadas una de otra, es decir, los camiones o tractores de terminal entran por una zona de la terminal y salen por otra diferente. De esta manera se permite la entrada y salida de dos vehículos en el mismo instante de tiempo agilizando el flujo de vehículos.

- La puerta de entrada y de salida es el mismo lugar físico y el puesto de control hace las funciones tanto de recepción como de expedición de vehículos. Esto ralentiza el tránsito de los vehículos por la terminal, pero ahorra costes en equipos y personal.

Los camiones entran por la puerta de entrada, donde están los puestos de control donde se realizan los trámites administrativos previos a la entrada y se le dan al vehículo las instrucciones necesarias para la carga o descarga del contenedor que transporta. Después, el vehículo se dirigirá a los puntos de carga cercanos a las vías si el contenedor a cargar/descargar pertenece a un tren cuyo proceso de carga/descarga ha comenzado. De no ser así, el camión se dirigirá a los puntos de carga/descarga cercanos a la zona de almacenamiento. Una vez que el camión está situado en un punto de carga/descarga, ya sea cercano a la vía o cercano a la zona de almacenamiento, una grúa móvil cargará o descargará el contenedor. Concluido el proceso de carga/descarga, el vehículo abandona la terminal utilizando la puerta de salida.

Normalmente, las terminales tienen un área de aparcamiento de mayor o menor capacidad, que se utiliza para la espera de camiones cuando todos los puntos de carga/descarga están ocupados o cuando la puerta de salida no está libre.

4.5. Conclusiones

Como se ha podido ver a lo largo de este capítulo, las terminales ferroviarias de transporte intermodal son muy complejas y dependen de muchos elementos, ya sean recursos o infraestructuras, para su correcto funcionamiento. Este proyecto se centra en el estudio de zonas de clasificación de plataformas. Estas zonas pueden ser el núcleo de una terminal o interactuar con una zona de carga/descarga operadas por grúas móviles. Otros tipos de terminales, como las atendidas por grúas pórtico quedan fuera de estudio de este proyecto fin de carrera.

Cabe destacar que el sistema de estudio no es un sistema único, ya que pueden existir terminales con un número distinto de vías de clasificación o de tractores de maniobras. De ahí el interés de programar un modelo de simulación flexible como el que se recoge en el capítulo siguiente, para poder simular de una forma rápida y sencilla diversas terminales de este tipo.

Capítulo 5. Programación y verificación del modelo de simulación

El objetivo de este capítulo es implementar los elementos y el funcionamiento de las terminales estudiadas en el capítulo anterior en un modelo de simulación.

En primer lugar, se indican los objetivos y la estructura del modelo de simulación, posteriormente, se indican las relaciones que hay entre los elementos del sistema real y los del modelo de simulación, la representación de estos elementos, su participación en los distintos procesos así como las hipótesis asumidas para el diseño y la programación del modelo de simulación.

A continuación, se enumeran y detallan los parámetros y variables del modelo de simulación que pueden ser configurados, así como el fichero Excel que ha sido necesario programar para llevar a cabo esta configuración.

Seguidamente se indican las variables de salida que posibilitan el estudio de los resultados de la simulación, y finalmente se describe cómo se han realizado las fases de verificación y validación del modelo de simulación.

5.1 Objetivos y estructura del modelo de simulación

El modelo de simulación debe ser capaz de proporcionar la versatilidad suficiente como para poder reproducir distintas configuraciones de terminales intermodales con una zona de clasificación y una zona de carga/descarga operada por grúas móviles. Debe proporcionar datos del uso de los recursos e infraestructuras y permitir el estudio y análisis de los niveles de servicio y de la productividad de la terminal. Debe también, ser ágil y fácil en su manejo, de tal forma que permita ser una herramienta “amigable” en su uso.

Con esta intención y para conseguir este propósito, la herramienta de simulación desarrollada tiene una configuración que consta de tres elementos, el modelo de simulación y dos ficheros Microsoft Excel. El modelo de simulación representa, de forma genérica, una terminal intermodal ferroviaria con sus elementos (recursos, infraestructuras, etc.) y procesos. Uno de los ficheros Excel posibilita la configuración de los escenarios a simular, permitiendo emular los tipos de terminal vistos en el capítulo anterior a partir de la asignación de diferentes valores al número de vías o de grúas, la longitud de las vías, los tamaños de las playas y los tiempos de operación de los equipos, por ejemplo. Este fichero se denomina, en adelante “Fichero de parametrización”.

El otro fichero Excel se trata del “Fichero de variables de salida”. En este fichero se encuentran los diferentes indicadores relativos a la constitución de terminales que se han considerado oportunos para tomar decisiones nuevas o al rediseño de terminales ya construidas. Hay variables de salida relativas a, por ejemplo, la productividad o el nivel de servicio. Este fichero facilita el estudio estadístico de las variables de salida del modelo de simulación (cálculo de medias, intervalos de confianza, etc.).

5.2 Programación del modelo de simulación

La programación del modelo de simulación se ha realizado en el entorno de simulación Witness, que se ha comentado y descrito detalladamente en el capítulo 3.

En el capítulo 4, se han comentado las infraestructuras, recursos y procesos de las terminales a simular y a continuación, se pretende explicar cómo se han representado estos elementos y procesos en Witness, de manera que seamos capaces de comprender cómo se consigue emular el aspecto y el funcionamiento del sistema real en el modelo informático.

La zona de carga/descarga se encuentra explicada en detalle dentro del PFC de Jiménez Treitas (2011). En el presente documento, se detalla la programación de la zona de clasificación y su integración con dicha zona de carga/descarga. Ambos aspectos son dos de las aportaciones originales de este proyecto.

5.2.1 Elementos representados

A continuación, se indica la relación que hay entre los elementos mencionados en el punto 4.2.2 del capítulo anterior y los del modelo de simulación.

Los contenedores, locomotoras eléctricas, vagones (plataformas), así como los trenes completos, se han representado por elementos tipo PART, que como se explicó en el capítulo 3, representan unidades de producto, que pueden ser procesadas y almacenadas en otros elementos del modelo de simulación. Además, Witness permite dar a los elementos PART atributos de distinta naturaleza, o lo que es lo mismo, la posibilidad de distinguir cada PART de los demás:

- Contenedores. Para conseguir la identificación de cada uno de los contenedores de forma inequívoca, se han asignado y tabulado las diferentes características o atributos posibles de cada uno de ellos. Se indica su tamaño, si está cargado o vacío, el modo de transporte empleado para su salida de la terminal (camión o tractor de terminal), cliente al que pertenece, etc.
- Locomotoras. Se estacionan en vías reservadas donde esperan desde que dejan al tren en la zona de clasificación hasta que llega la hora de salida del tren recompuesto.
- Plataformas. Representan los vagones en los que se cargan los contenedores. Su tamaño es de 60 pies de longitud, pueden cargar varios contenedores de

distintas dimensiones a la vez, siempre que la suma de sus tamaños no sea mayor de los 60 pies indicados.

- **Trenes completos.** Este elemento está compuesto a su vez por varios elementos PART, como son contenedores, plataformas y una locomotora eléctrica. De esta forma, se puede gestionar su paso por las vías y su entrada o salida de la terminal. El uso de atributos permite saber si el tren llega de otra terminal o va hacia otra terminal o, por el contrario, si su origen o destino es otra zona de la terminal diferente de la que se está analizando (zona de carga/descarga o zona de clasificación). Si un tren llega o sale hacia otra terminal de la red ferroviaria, el tren estará conducido por una locomotora eléctrica. Por el contrario, si un tren circula entre dos zonas de la misma terminal, llevará enganchado un tractor diesel de maniobras. En la figura 5.1, se observa la PART (en rojo) que representa a un tren completo, es decir, la locomotora eléctrica, las plataformas y los contenedores que transporta. En el instante captado en la figura, el tren está en la vía de entrada a la zona de clasificación. El display de la vía de entrada representa, en amarillo, la locomotora y en naranja, que se trata de un tren entrante.

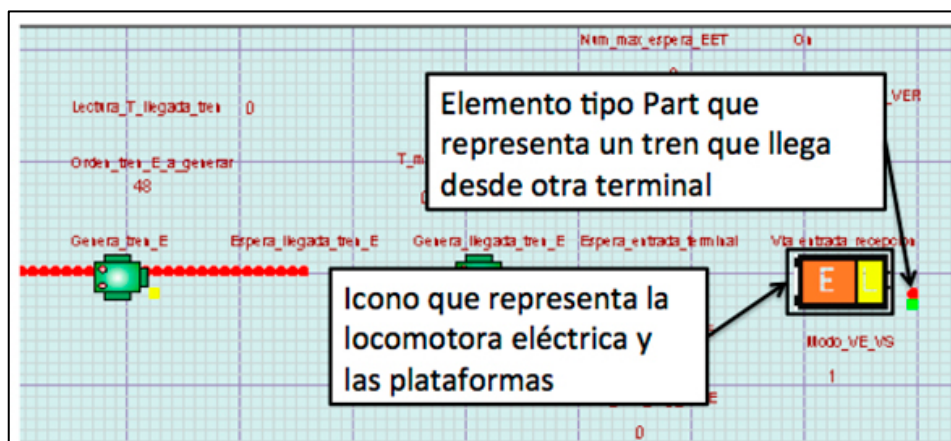


Figura 5.1 Tren entrante ocupando la vía de entrada

Fuente: *elaboración propia*.

A continuación, se explican cómo han sido representados los recursos de la terminal:

- Tractores de maniobra. Tal y como se utilizó en el documento de Jiménez Treitas (2011), se representan como elementos LABOR (véase la figura 5.2). Cada proceso que realiza un tractor de maniobras se representa por un elemento MACHINE. Este elemento MACHINE requiere del elemento LABOR, que es el tractor de maniobra, para trabajar. Se han utilizado variables, atributos y distribuciones de probabilidad para determinar las averías y los tiempos de reparación de los tractores, así como sus tiempos de operación.

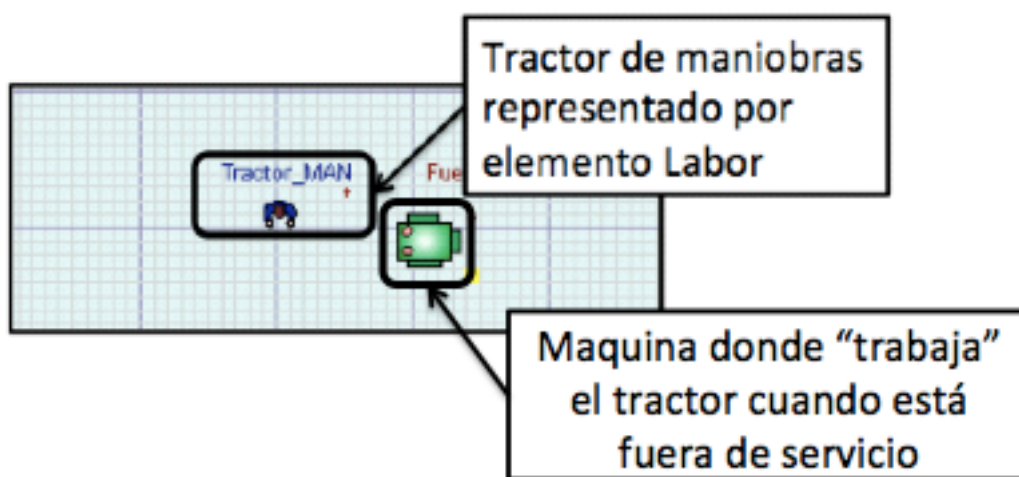


Figura 5.2 Representación de un tractor de maniobras

Fuente: *elaboración propia*.

- Trabajadores. En este caso, no se representan a los trabajadores (por ejemplo, que trabajan en los tractores de maniobra) explícitamente. Según lo comentado anteriormente, para representar el trabajo de los tractores de maniobra se utilizan elementos LABOR y MACHINE. Si hay dos tractores, el elemento LABOR y el elemento MACHINE estarán en cantidad 2. Si sólo hay un trabajador encargado de atender los tractores, nunca podrán trabajar a la vez los dos LABOR ni las dos máquinas. Para representar los turnos de trabajo de

los operarios que atienden estos equipos, se hace uso de elementos SHIFT, que se configuran de acuerdo al horario establecido para cada puesto de trabajo. Los elementos SHIFT y los LABOR, se relacionan de manera que cada tractor sólo trabaje durante el horario de trabajo que le corresponda. Sabiendo el estado del proceso, se puede determinar si un tractor se encuentra en ese instante dentro de su turno de trabajo o no.

Una vez comentados los recursos de la zona de clasificación, a continuación, se relacionan los elementos utilizados para representar sus infraestructuras, tales como las vías.

- Vías de circulación de los trenes entre zonas de la terminal. Se ha hecho uso de elementos PATH para unir la zona de carga/descarga y la zona de clasificación. Las distancias a recorrer en estos trayectos siempre serán configuradas por el usuario.

En la figura 5.3, se puede ver un elemento PART (un tren) recorriendo un elemento PATH, que representa el movimiento de trenes desde la zona de carga/descarga a la zona de clasificación.

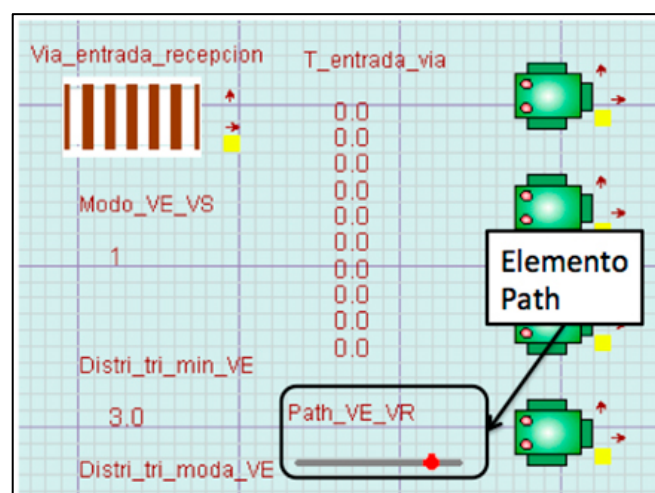


Figura 5.3 Vías de circulación de trenes entre la zona de carga/descarga y de clasificación

Fuente: *elaboración propia*.

- Vías propias de la zona de clasificación. En la zona de clasificación, hay dos tipos de vías, las vías de entrada/recepción-salida/expedición y las vías de clasificación.

En las vías de entrada y salida de trenes se llevan a cabo los procesos de entrada y salida de trenes de la zona de clasificación. En el proyecto de Jiménez Treitas (2011) se utilizaron elementos MACHINE para representar este tipo de vías y al ver que funcionaban correctamente, se ha decidido continuar con el mismo tipo de elementos para representarlas en este proyecto, de forma que los trenes pueden ocupar las vías y esperar allí hasta que se hayan concluido las operaciones que sea necesario realizar sobre ellos. Con una serie de variables adicionales, se almacenan los datos de los trenes que están en las vías de entrada/salida, (identificador del tren, origen, destino, etc.).

En la figura 5.4, se puede ver un tren entrante ocupando la vía de entrada. Debajo de la vía de entrada se ve la variable que hace referencia al modo de trabajo de la vía de entrada y de salida, si hay un uno, no trabajarán en paralelo, si hay un dos, si lo harán. En el primer caso, solo habría una vía para la entrada/salida de trenes. De tal forma que si está ocupada por un tren entrante y hay un tren que quiere salir, este último debería esperar a que la vía se liberara. Segundo caso, habría una vía dedicada a la entrada de trenes. Así, de esta manera un tren puede entrar mientras que otro sale.



Figura 5.4 Tren entrante recorriendo la vía de entrada

Fuente: *elaboración propia*.



Por otro lado, está el haz de vías de clasificación. Estas vías, están representadas con mayor nivel de detalle que las otras, ya que en ellas se llevan a cabo los procesos de clasificación de las plataformas. Para estas vías, se han empleado dos elementos BUFFER, que representan, uno, la locomotora/tractor de maniobras (dependiendo de si el tren viene de fuera de la terminal o de la zona de carga/descarga de la misma terminal), y, otro, las plataformas. Además, este último BUFFER viene representado en cantidad mayor que 1, para representar, de forma individual, las plataformas que caben en la vía (ver elementos en gris de la figura 5.5). Así, cuando un tren entra en una vía de clasificación, en cada elemento BUFFER, se coloca una plataforma hasta que se completa el número de ellas que lleva el tren, colocando también los contenedores que están cargados en cada plataforma. En la figura 5.5, en la primera vía hay estacionado un tren con cinco plataformas vacías. En la segunda vía, el tren estacionado contiene cuatro plataformas. El tren que se haya en la tercera vía contiene siete plataformas y no tiene locomotora. En la vía 4, las plataformas del tren estacionado contienen contenedores. Los contenedores aparecen marcados con colores y letras: la tercera plataforma contiene un contenedor de 40 pies lleno, la quinta plataforma contiene un contenedor de 30 pies lleno y la sexta plataforma contiene un contenedor de 40 pies vacío. Un cierto número de variables se encargan de registrar los datos de los trenes entrantes y salientes, (identificador, origen, destino, etc.), así como los datos de los tiempos de clasificación acumulados de los trenes.

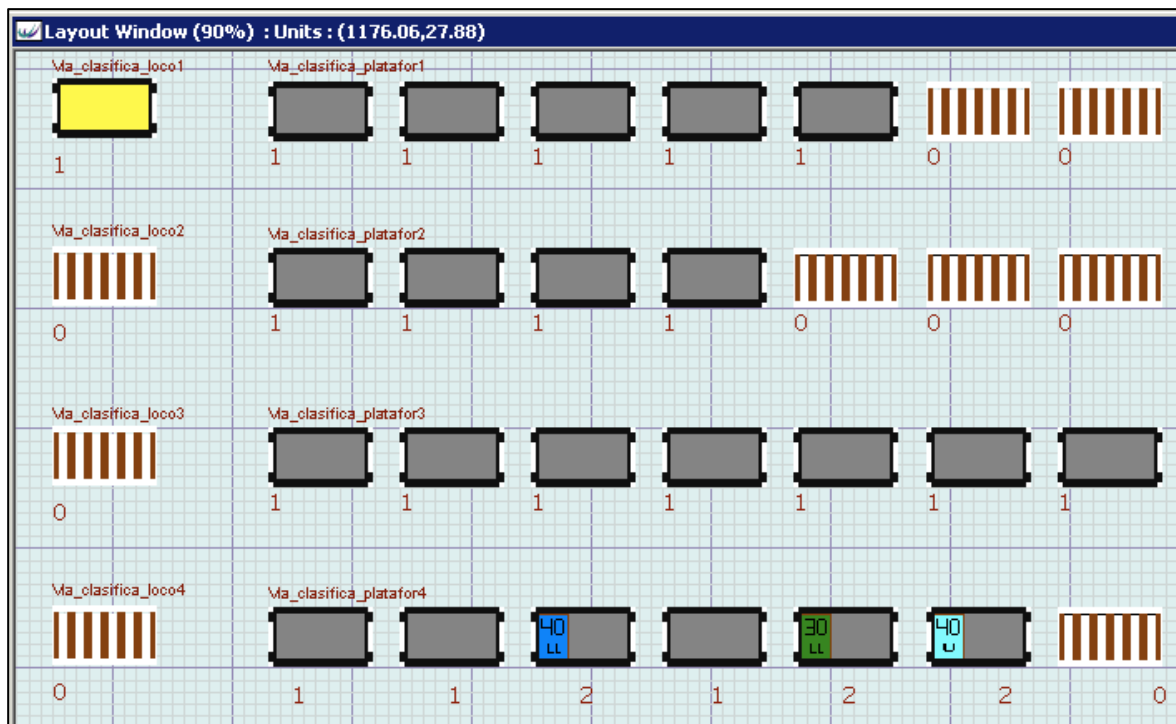


Figura 5.5 Detalle de las vías de clasificación de trenes

Fuente: *elaboración propia*.

En la siguiente figura podemos ver dos elementos MACHINE, Via_clasifica_ocupada, que representa si cada vía tiene o no asignado un tren, y Genera_composicion_trenE, que representa si un tren está llegando a las vías de clasificación. Las variables del centro de la figura son diferentes variables para distinguir los trenes entre sí y el estado del proceso de clasificación (1, indica que se están generando las plataformas y contenedores que componen el tren entrante). La variable ID_tren_a_descomponer muestra la ID del tren que va a ser descompuesto, según el fichero de parametrización; la variable Posicion_en_lista_trenes indica en qué posición está el tren dentro del plan de trenes entrantes; la variable Avance_proceso muestra en que instante de su recomposición está el tren. La figura 5.6, muestra 4 vías ocupadas. La primera por un tren entrante cuyas plataformas van a ser clasificadas, (véase que las variables “id_tren_a_descomponer” y “Posicion_en_lista_trenes” toman valores mayores que cero. Las restantes vías están ocupadas por trozos de trenes procedentes de un

tren entrante anterior (ahora las variables “id_tren_a_descomponer” y “Posicion_en_lista_trenes” valen cero.

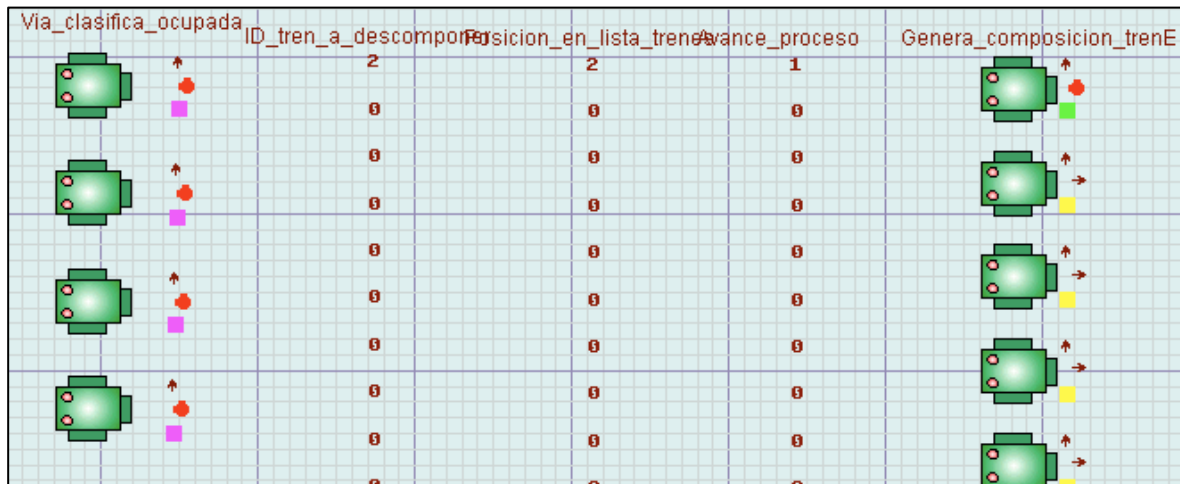


Figura 5.6 Detalle de diferentes elementos representando estados de vías

Fuente: *elaboración propia*

5.2.2 Procesos representados

A continuación, se explica la programación de los procesos que se han descrito en el capítulo 4, apartado 4.3 de este documento.

- Entrada de trenes en la zona de clasificación

Como se comentó en el capítulo anterior, los trenes que entran en la zona de clasificación pueden provenir de fuera de la terminal o de la zona de carga/descarga.

En el instante $t=0$, se generan todos los elementos PARTS equivalentes a los trenes entrantes que proceden de otras terminales y se quedan almacenadas en el elemento BUFFER Espera_llegada_tren_E a la espera de que llegue el momento de su llegada real a la zona de clasificación.

Cuando llega ese momento, una PART sale del BUFFER Espera_llegada_tren_E hacia el elemento MACHINE Genera_llegada_tren_E. A continuación, pasa al BUFFER Espera_entrada_terminal donde se le dan todos los atributos necesarios a la PART (origen, destino, Id, etc.). Después, pasará a la Via_entrada_recepcion, donde estará un tiempo, lo que tarda el tren en entrar en la terminal. (Véase la figura 5.7).

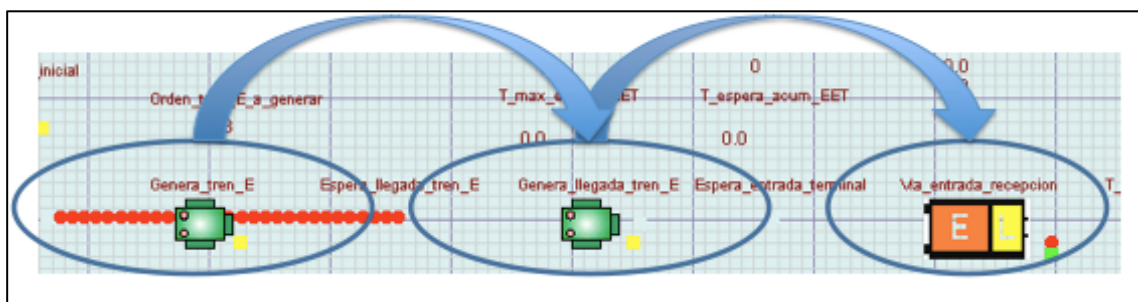


Figura 5.7 Proceso de entrada de un tren en la terminal

Fuente: *elaboración propia*.

Una vez pasado ese tiempo en la Via_entrada_recepcion, la PART continúa hacia la MACHINE Via_clasifica_ocupada. En este elemento se reserva la primera vía disponible para que el tren sea clasificado. A continuación, el tren ocupa la vía de clasificación dividiéndose la PART inicial en tantas como plataformas y contenedores tenga el tren, más la locomotora. (Véase la figura 5.8)

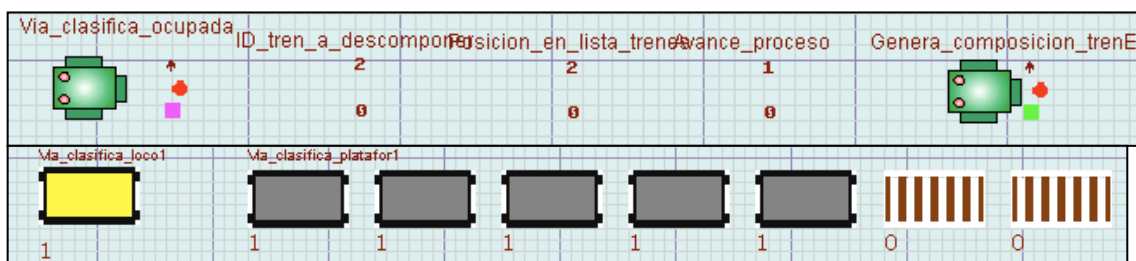


Figura 5.8 Tren con cuatro plataformas y sin contenedores posicionando en una vía y MACHINE Via_clasifica_ocupada ocupada para reservar dicha vía

Fuente: *elaboración propia*

Si se trata de un tren que proviene de la zona de carga/descarga la entrada es similar. La única diferencia radica en que este tren no se crea en $t=0$ en la zona de clasificación, si no que se crea cuando corresponda en la zona de carga/descarga para después enviarlo con un tractor de maniobras a la zona de clasificación.

- Clasificación de las plataformas

En la figura 5.9 se ve un tren recién llegado a las vías de clasificación con plataformas vacías y cargadas. En el momento que se coloca el último contenedor, la locomotora/tractor de maniobras es retirada y se inspecciona la carga transportada por el tren.

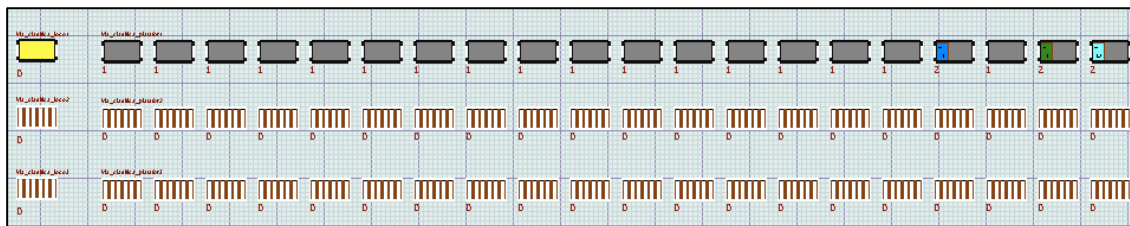


Figura 5.9 Tren recién entrado y preparado para que sus plataformas sean clasificadas

Fuente: *elaboración propia*

La PART que representa la locomotora, (véase en amarillo en la figura 5.9), es trasladada a un elemento MACHINE denominado *Inspeccion_retirada_loco*. Esta MACHINE tiene dos ciclos, uno correspondiente a la retirada de la locomotora y otro correspondiente a la inspección de la carga transportada por el tren.

- Retirada de la locomotora

En el caso de que el tren sea transportado usando un tractor de maniobras (ya que el tren provenga de la zona de carga/descarga de la misma terminal), éste se retirará en cualquier momento. Si es transportado por una locomotora eléctrica, el retiro de la locomotora tendrá que hacerse dentro del turno de los trabajadores, es decir, que el instante t se encuentre dentro del tiempo estipulado en el fichero de parametrización por el usuario del modelo.

- Inspección de la carga transportada por el tren

Se inspecciona la carga del tren para comprobar que el número de plataformas/contenedores entrantes coincide con el número previsto. Para realizar esta operación, debe haber trabajadores disponibles. En este caso, los trabajadores se han representado por un elemento MACHINE que sólo trabaja si está activo un elemento SHIFT. La activación de este SHIFT viene condicionado por el fichero de parametrización.

Una vez retirada la locomotora e inspeccionada la carga del tren, empieza la clasificación de las plataformas propiamente dicha.

El primer paso es reservar las vías que van a ser utilizadas para clasificar, según destinos de carga final, las plataformas del tren entrante. Estos destinos de carga final corresponden con los trenes salientes. Para ello la PART sale de `Inspeccion_retirada_loco`, y se coloca en el elemento MACHINE `Reservar_vias_M`, este elemento analiza si las plataformas que van a ser clasificadas tienen ya una vía reservada. Sino es el caso, se reserva la primera vía disponible para el primer trozo de plataformas a clasificar. A continuación se vuelve a repetir el proceso hasta que todas las plataformas a clasificar tienen asignadas una vía de destino, es decir, un tren saliente.

Las plataformas de un tren entrante van siempre agrupadas por destino. De esta forma, se empieza la retirada de todo el bloque de PARTS que tienen como atributo el mismo destino.

Estas PARTS se trasladan hacia el elemento MACHINE `Recomposición`. Como es necesario un tractor de maniobras para mover las plataformas por la terminal, se utiliza un elemento LABOR para simular este proceso. En la figura 5.10 podemos ver representada la máquina `Recomposición` (en cantidad igual al número de vías),

el tractor de maniobras (trabajador) y el primer lote de plataformas a clasificar (en rojo).

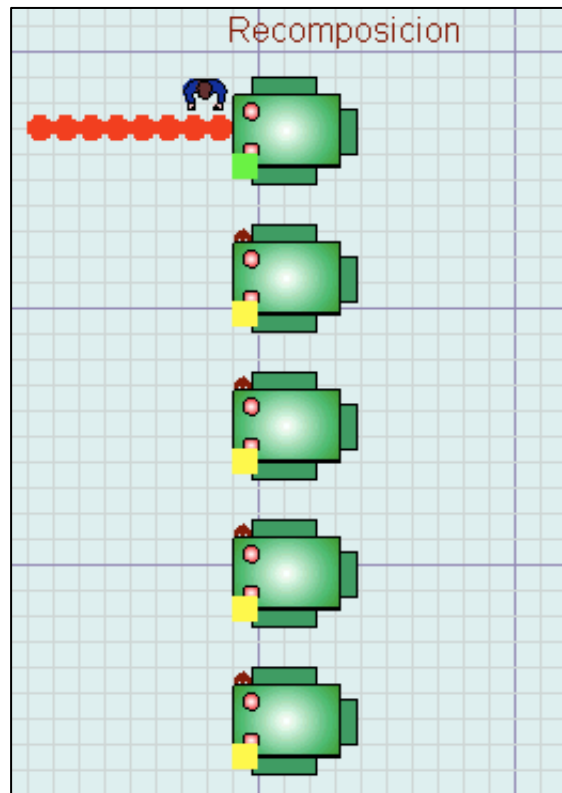


Figura 5.10 Elementos PARTS (plataformas y contenedores) en el elemento MACHINE Recomendación con elemento LABOR simulando el tractor de maniobras

Fuente: *elaboración propia*

Una vez que el tiempo de ciclo de la MACHINE Recomendación ha acabado, se colocan las plataformas en la vía designada anteriormente al tren saliente del cual forman parte.

A continuación, se repite el proceso para los siguientes grupos de plataformas hasta que se acaba de descomponer el tren entrante. En la figura 5.11 se pueden ver las plataformas del primer tren entrante (indicado en la figura 5.9) ya clasificadas en tres vías según su destino final.

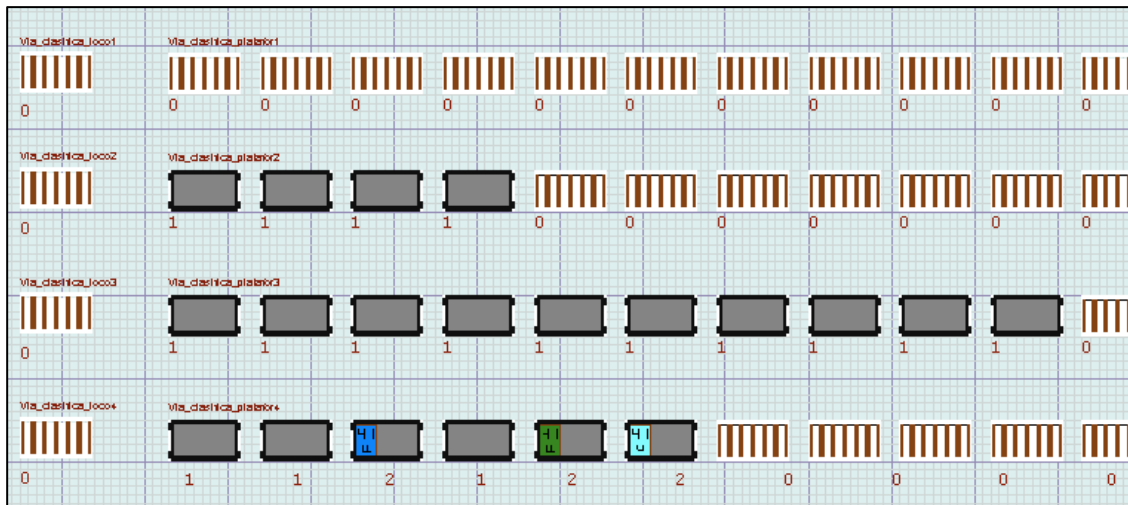


Figura 5.11 Plataformas clasificadas

Fuente: *elaboración propia*

- Salida de trenes de la zona de clasificación

En este proyecto, además de simular la zona de clasificación de una terminal intermodal, se ha integrado dicha zona con la zona de carga/descarga del proyecto de Jiménez Treitas (2011).

Una vez el tren saliente posee las plataformas correspondientes, espera al instante de salida t (definido por el usuario en la interfaz Excel), para abandonar la zona de clasificación. Una vez llega ese momento, todas las PARTS se mueven al elemento MACHINE Salida_tren, donde serán agrupadas en un único elemento PART. En la siguiente figura podemos ver los dos tipos de trenes que salen de la zona de clasificación de la terminal: a la izquierda, el que sale fuera de la terminal y la derecha el que va a la zona de carga/descarga. En el primer caso, además de agrupar las plataformas y contenedores que componen el tren (marcadas como “E”, externo), se ha añadido una locomotora eléctrica (marcada como “L”) que efectuará la salida del tren de la terminal. En el segundo caso, aparecen agrupadas las plataformas y contenedores del tren (marcadas como “I” interno).

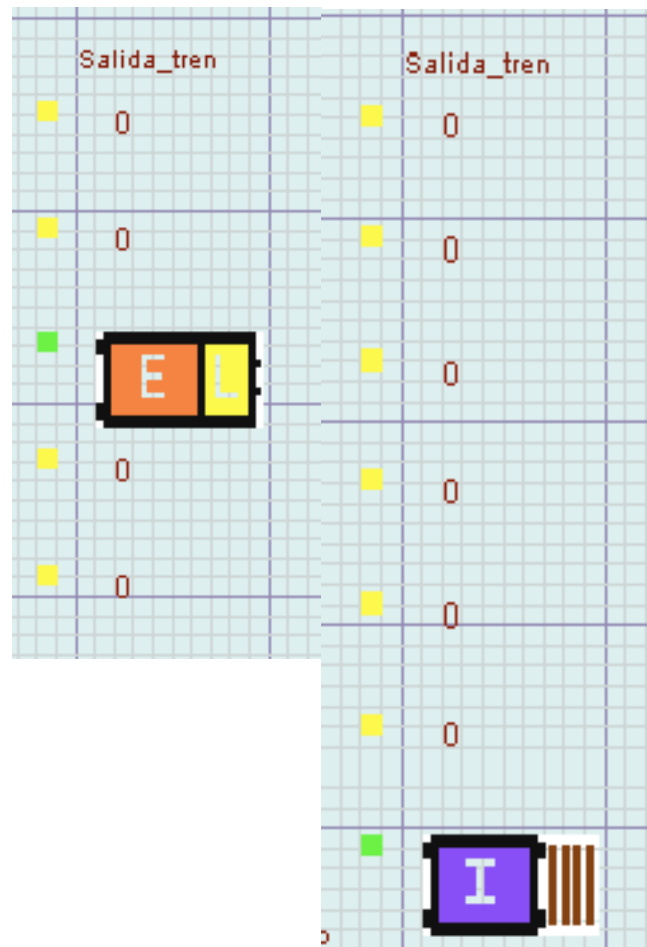


Figura 5.12 Trenes salientes en Salida_tren

Fuente: *elaboración propia*

A continuación, si el tren saliente va hacia la zona de carga/descarga, pasa desde la MACHINE Salida_tren a la MACHINE Salida_con_tractor para de esta forma colocarle un tractor de maniobras libre para que lo lleve hacia la otra zona. En la figura 5.13 podemos ver el momento en el que el tren está en la MACHINE Salida_con_tractor. El tractor aparece representado en el display mediante la letra “T” y el elemento LABOR situado sobre el último índice de “salida_con_tractor”.

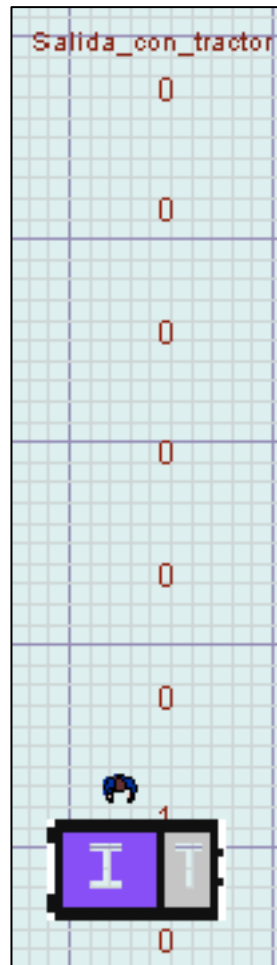


Figura 5.13 Tren al que se le acaba de enganchar el tractor de maniobras para circular hasta la zona de carga/descarga de la terminal

Fuente: *elaboración propia*

Finalmente, ambos tipos de trenes pasarán por el elemento MACHINE Via_Salida_expedición antes de abandonar la zona de clasificación (véase la figura 5.14).



Figura 5.14 Trenes salientes de la zona de clasificación

Fuente: *elaboración propia*

5.2.3 Hipótesis asumidas en la programación del modelo

Para llevar a cabo la programación del modelo, ha sido necesario asumir una serie de hipótesis acerca del funcionamiento de la terminal y de las operaciones que se llevan a cabo en ella. Se detallan a continuación:

- Las plataformas van agrupadas por destino, sin importar el número total de plataformas por destino dentro de un mismo tren.
- Los trenes transportan contenedores de 20, 30 y 40 pies de longitud, que pueden estar cargados o vacíos (sin tener en cuenta su peso real), sobre plataformas de 60 pies.
- Los trenes salientes sólo salen de la terminal si transportan el número de plataformas que indica el plan de trenes, pudiendo sufrir retrasos en su instante de salida a causa de retrasos en el proceso de clasificación, congestión en las vías de recepción/expedición y/o salida de la terminal, etc. Además, pueden producirse retrasos a causa de interferencias con otros trenes de la red ferroviaria general.
- Si varios trenes esperan para ser clasificados, el tractor que vaya a realizar la operación seleccionará aquel tren que lleve más tiempo esperando, con lo que se intenta reducir de forma global el tiempo de espera.
- Los trabajadores no han sido representados de forma directa, habiéndose representado en su lugar los puestos de trabajo en los que operan.

5.3 Flexibilidad aportada al modelo

En este apartado, se explica la estructura del fichero de parametrización que se utiliza para configurar y alimentar el modelo informático de simulación. Este

fichero es otra aportación original al proyecto. Jiménez Treitas (2011) y Borja Cedrón (2011) también utilizaron un fichero MS Excel para configurar su modelo. Sin embargo, estos ficheros carecían de explicaciones de tal forma que prácticamente solo podía ser utilizado por los programadores del modelo de simulación y no por un usuario sin conocimientos del código programado en Witness. Además existían ciertos datos que no podían ser configurados a través de MS Excel. Para su configuración, se utilizaban ficheros *.dst, *.csv, etc., de los que hablaremos en adelante. Para simplificar el proceso de configuración del modelo, haciendo que personas ajenas a su programación puedan configurarlos (por ejemplo el gestor de una terminal existente) he creado un nuevo fichero de configuración Excel. El usuario ha de asignar los datos requeridos en sus hojas. Los datos están divididos en 6 hojas. Las hojas que han de rellenarse contienen datos relativos al plan de trenes, llegadas de vehículos a la terminal, configuración de recursos y tiempos de operación, modos de operación, configuración de las zonas de almacenamiento, etc.

Analizamos cada hoja del fichero Excel para ver qué datos deben configurarse:

- **Hoja 1. Demanda**

Aquí, el usuario ha de completar el plan de trenes, es decir, todos los datos relativos a los trenes entrantes y salientes de la zona de carga/descarga y de clasificación, tales como origen, destino, si el tren es cliente o multiclente, además de todos los contenedores que transporta cada tren, con sus características correspondientes: tamaño, si va cargado o vacío, el modo posterior (camión o tren), y en el caso de salir en tren, el tren saliente en el que va a ir y la posición o plataforma que ocupará. También es en esta hoja donde se completan los datos de las terminales con las que intercambia carga la terminal estudiada, los operadores de la red y los clientes de los contenedores. Una vez configurado lo descrito hasta ahora, hay que configurar las llegadas de los camiones/tractores con plataformas a cargar y descargar.

El modelo de simulación permite representar fuentes de aleatoriedad sobre la demanda. En esta hoja es donde hay que indicar las diferentes distribuciones de probabilidad asociadas a las diferentes fuentes de aleatoriedad que existen. Se pueden configurar retrasos/adelantos sobre el instante de entrada de los trenes, variaciones sobre la composición de los trenes entrantes, retrasos sobre el instante de salida de los trenes producidos por interferencias con otros trenes (por ejemplo, de pasajeros) que circulan por la red y variaciones sobre la composición de los trenes salientes, (por ejemplo, porque un cliente decida cancelar un servicio que tenía previamente contratado).

- **Hoja 2. Demanda_aux**

En esta hoja no se cumplimenta ningún dato ya que esta hoja se utiliza como interfaz entre Witness y MS Excel. Los datos indicados en la hoja 1, (el plan de trenes, el patrón de llegadas de los camiones, etc.) se configuran en un formato comprensible para el usuario, que mediante un conjunto de macros, se transforman en un formato inteligible para Witness y se almacenan en la hoja 2. Witness leerá los datos de demanda de la hoja 2.

- **Hoja 3. Zona_CD_Infra**

En esta hoja se configura la zona de carga/descarga de la terminal. Aquí se define el número de puertas de entrada/salida de camiones y/o tractores con plataforma y su forma de operar, es decir, si pueden trabajar en paralelo o no. También hay que detallar el horario de entrada/salida de los camiones/tractores con plataforma, así como el tiempo empleado en ambos casos. También hay que detallar detalles relativos a la zona de aparcamiento de camiones/tractores con plataformas, como son la capacidad o el tiempo de recorrido entre la puerta de entrada y esta zona.

En esta hoja, hay que definir el número de vías de entrada/salida que hay y su horario de atención al público, así como el tiempo que tardan en entrar y en

salir los trenes. También hay que definir el número de vías de recepción/expedición, en caso de que la terminal disponga de ellas.

Además, hay que rellenar, en caso de que la terminal posea varias playas de carga/descarga atendidas por grúas móviles, los trenes entrantes y salientes que será cargados/descargados en cada playa. Así mismo hay que definir la longitud de la vía de carga/descarga, la capacidad de almacenamiento de la playa de almacenamiento de contenedores, el número máximo de camiones que pueden acceder a cada playa de forma simultánea, la velocidad de los camiones /tractores con plataforma y la distancia entre distintos puntos de la zona de carga/descarga.

Por ultimo, se tienen que indicar los turnos de trabajo para realizar las inspecciones realizadas sobre los trenes, así como el tiempo que se tarda en realizar dicha operación y los parámetros relativos a la carga de trenes (modo empleado, tiempo en el que se inicia la ventana temporal de carga, la antelación con la que se cierra la carga del tren y la antelación con la que un tren es movido de las vías de carga/descarga a las vías de recepción/expedición para preparar su salida de la terminal.

- **Hoja 4. Grúas móviles**

En este caso los datos se refieren a las grúas móviles. Número de grúas, turnos de trabajo, averías, tasas de reparación, tiempos de proceso de los contenedores, etc., son parte de los datos a configurar en esta hoja. También han de proporcionarse los datos relativos a las distancias que hay entre las diferentes zonas de la terminal a las que las grúas tienen acceso y sobre la velocidad de circulación de estos equipos por cada tramo, de forma que Witness pueda incorporar esa información al modelo.

- **Hoja 5. Zona_Clasif**

En esta hoja se configuran elementos relacionados con la zona de clasificación de la terminal. Se elige el modo de operación de las vías, si la terminal tiene vías de entrada y salida independientes o no, además del número de vías de clasificación de que dispone la terminal, así como su longitud. Se define también el horario en el que los trenes pueden entrar y salir de la terminal, cuando se puede retirar la locomotora/tractor de maniobras y los turnos para inspeccionar la carga de un tren antes/después de clasificar las plataformas.

A su vez, hay que indicar el tiempo que tarda el tren en recorrer la vía de entrada, el tiempo para inspeccionar la carga de un tren entrante antes de clasificar sus plataformas, el tiempo que se tarda en inspeccionar la carga de un tren antes de su salida y el tiempo que tarda el tren en recorrer la vía de salida. Estos valores pueden ser deterministas, seguir una distribución de probabilidad triangular o seguir una distribución de probabilidad empírica. También se debe rellenar el número máximo de locomotoras/tractores de maniobra que se pueden retirar/colocar en paralelo, el número máximo de inspecciones previas/posteriores a la clasificación que pueden ser realizadas de forma simultánea así como el número máximo de tractores de maniobras que pueden realizar tareas de clasificación de forma simultánea.

- **Hoja 6. Tractores de maniobras**

Los datos que hay que introducir en esta hoja corresponden a los diferentes parámetros que los tractores de maniobras necesitan para funcionar correctamente en el modelo. Hay que elegir el número de tractores que tiene la terminal, los turnos que trabaja cada uno de ellos, la probabilidad de que se averíen y en que zona trabajan (ya sea en la zona de clasificación, en la zona de carga/descarga o en ambas). En esta hoja también hay que introducir el tiempo que tardan los tractores en realizar las diferentes operaciones que ejecutan dentro de la terminal.

Para simplificar la introducción de datos en el fichero Excel y evitar errores posteriores, se han incorporado explicaciones que indican el dato a introducir, sus unidades y su rango de variación (si procede), validaciones de celdas (que no dejan introducir texto si el dato requerido es numérico por ejemplo) y avisos que no desaparecen hasta que un dato de entrada requerido se ha completado. Estos mecanismos de control no fueron considerados con anterioridad en los ficheros Excel desarrollados por Jiménez Treitas (2011) y Borja Cedrón (2011).

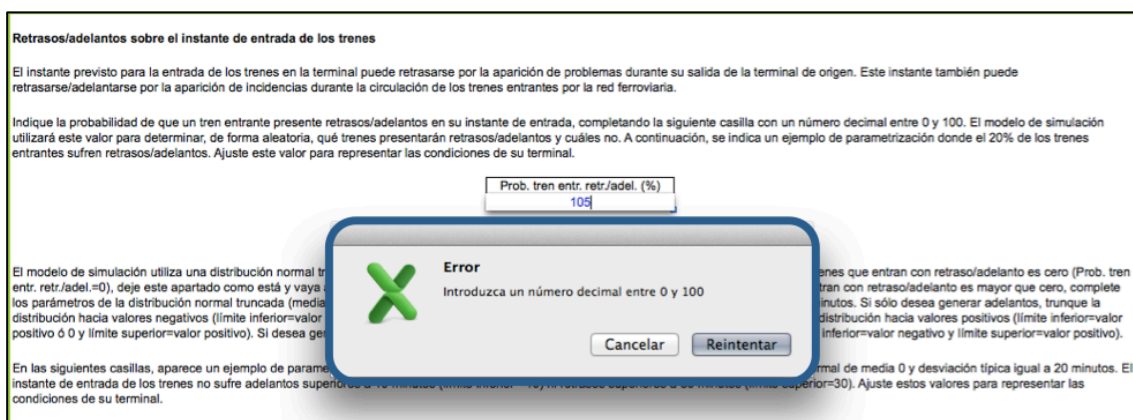


Figura 5.15 Mensaje de error al introducir un dato incorrecto

Fuente: *elaboración propia*

Una vez descritas las hojas del fichero de parametrización, hay que explicar la manera en que Witness es capaz de leer y obtener datos de manera automática de este fichero.

Se han usado dos métodos para relacionar el fichero Excel y el modelo: uno es mediante la lectura directa de la celda donde se encuentra el dato, y la otra forma es a través de la lectura de ficheros con una estructura específica, generados en MS Excel mediante el uso de macros.

- Lectura directa. En cada elemento, variable, máquina, etc. de Witness, es posible permitir que un dato externo al modelo sea leído usando funciones

específicas. Así, puede permitirse leer datos que estén almacenados en una celda o rango de celdas en un fichero de tipo Excel.

En la figura 5.16, se muestra el cuadro de diálogo en el que se programan las acciones al inicializar del elemento VARIABLE que recoge la longitud máxima de las vías de clasificación (medida como el número máximo de plataformas de 60 pies que puede albergar). La instrucción indica que el valor de la variable ha de leerse de un fichero tipo Excel (de nombre “Nombre_fichero”), de una hoja específica (“Zona_Clasif”) y de una celda concreta (“I43”). Para actualizar el número máximo de plataformas que componen las vías de clasificación, en las acciones al inicializar los BUFFER que representan este elemento, se escribe la segunda instrucción indicada en la figura 5.17 (“SET QUANTITY OF”). El usuario, sólo tiene que modificar la celda “I43” de la hoja “Zona_Clasif” del fichero de parametrización para que al iniciar la simulación se actualice el número plataformas que tienen las vías. De esta forma, se evita tener que reprogramar el modelo cada vez que se introduce un cambio en la configuración de un escenario.



Figura 5.16 Cuadro de diálogo del elemento VARIABLE max_vias_recomp

Fuente: *elaboración propia*

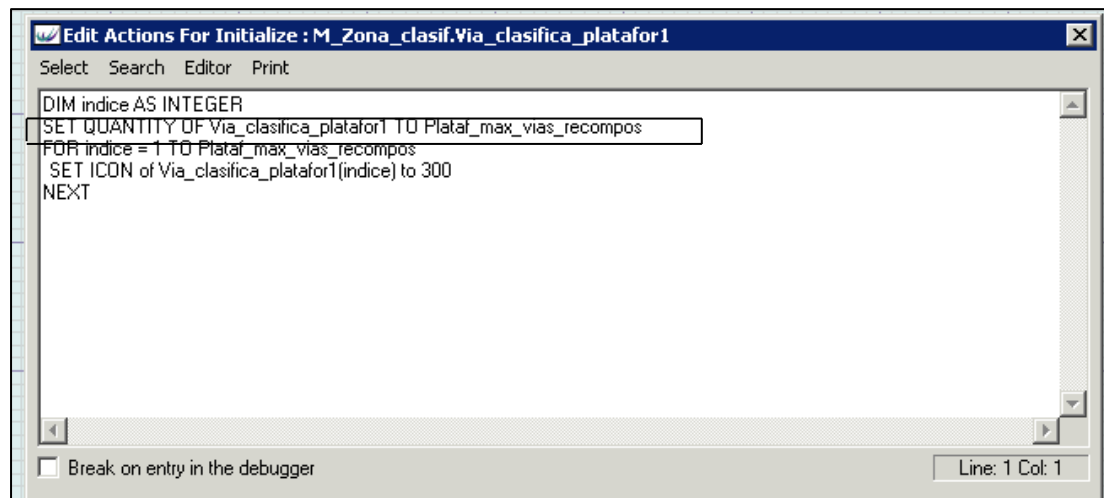


Figura 5.17 Cuadro de diálogo del elemento que representa la Via_clasifica_platafor1

Fuente: *elaboración propia*.

- Lectura mediante el uso de ficheros con estructura específica. Witness es capaz de leer ficheros de datos con información relativa, por ejemplo, a distribuciones de probabilidad, turnos de trabajo, etc. En la ayuda de Witness, puede encontrarse la información necesaria para estructurar la información de forma que Witness la entienda. Para generar estos ficheros de forma instantánea, se emplean macros elaboradas en el fichero MS Excel. En la figura 5.18, se toma como ejemplo la macro relativa a la generación del tiempo que tarda un tren en recorrer la vía de salida. En este caso, se va a generar este tiempo a partir de una distribución empírica de probabilidad

3.Dist. Empírica

Puntos	Valores (min)	Probabilidades
1	5,00	0,10
2	6,00	0,10
3	6,50	0,50
4	7,00	0,10
5	7,50	0,20
6	0,00	0,00
7	0,00	0,00
8	0,00	0,00
9	0,00	0,00
10	0,00	0,00
SUMA PROBABILIDADES		1,00

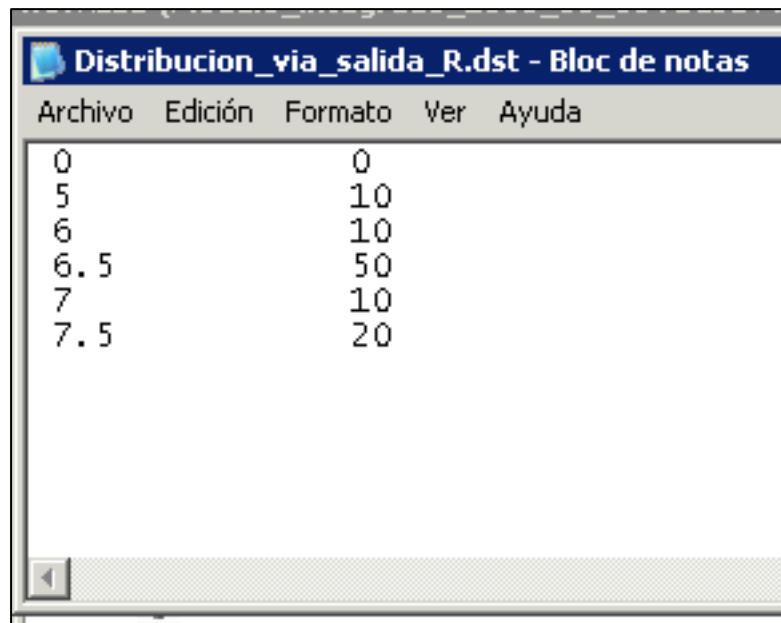
En ausencia de errores de configuración, pulse el siguiente botón para generar los ficheros que requiere el modelo de simulación. Tras aceptar el cuadro de diálogo que aparecerá por pantalla, continúe con la parametrización.

Generar fichero *.dst

Figura 5.18 Datos para elaborar una distribución del tiempo que tarda un tren en recorrer la vía de salida y botón para generar el fichero *.dst

Fuente: *elaboración propia*

Una vez completada la información necesaria para generar la distribución (figura 5.18), se ejecuta la macro pulsando el botón correspondiente, de forma que se genera el fichero tipo .dst con los datos de la distribución de tiempos (véase la figura 5.19).



Archivo	Edición	Formato	Ver	Ayuda
0		0		
5		10		
6		10		
6.5		50		
7		10		
7.5		20		

Figura 5.19 Archivo *.dst generado por la macro

Fuente: *elaboración propia*

El fichero .dst generado, contiene la información introducida en las celdas del fichero de parametrización, pero en un formato y con una estructura concreta que permite que Witness sea capaz de leer correctamente los datos. Ahora, Witness ya puede leer los datos de esta distribución, indicándole el nombre del archivo que tiene la información (véase la figura 5.20). En esta figura, la instrucción indica que ha de leerse el archivo “Distribucion_via_salida_R.dst” para actualizar el elemento Witness de nombre “Dist_tiempo_vs”. De esta forma, se permite que el usuario cambie los datos de distribuciones empíricas de datos, turnos de trabajo, etc. y el modelo se actualice usando los archivos generados por las macros de MS Excel, sin necesidad de reprogramar ninguna instrucción en el modelo. Este sistema de macros es original de este proyecto. Como se ha comentado anteriormente, Borja (2011) y Jesús (2011) también usaban ficheros *.dst. Sin embargo había que conocer su estructura interna y entrar en cada uno de ellos para cambiar los datos manualmente.

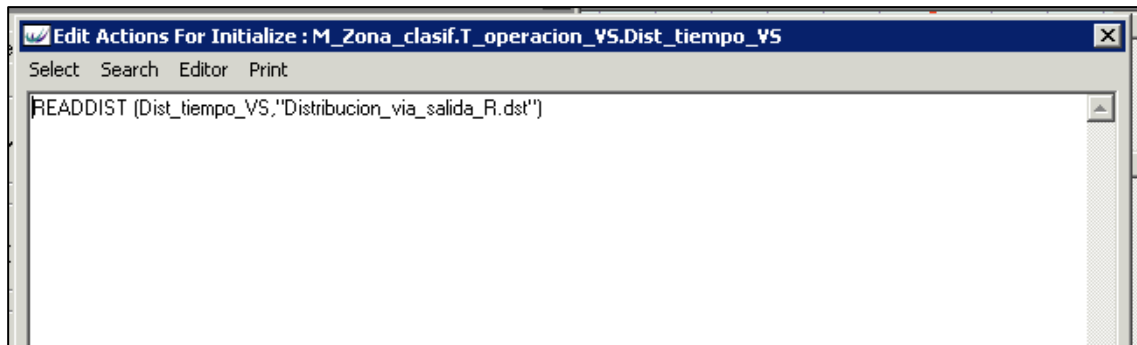


Figura 5.20 Orden para una distribución lea el fichero *.dst generado por la macro

Fuente: *elaboración propia*

5.4 Variables de salida

Witness ofrece la posibilidad de obtener un fichero de datos al finalizar la simulación de un escenario en el que se muestran los resultados del modelo.

Los resultados que proporciona la simulación hacen referencia al nivel de servicio de la terminal estudiada, al uso de sus recursos e infraestructuras y a su productividad.

El objetivo del fichero Excel de variables de salida que se describe en este apartado es servir como herramienta de apoyo para tomar decisiones relativas al diseño de nuevas terminales o al rediseño de terminales ya existentes.

El fichero contiene variables de salida relativas a la zona carga/descarga y a la zona de clasificación. En los documentos de Jiménez Treitas (2011) y Borja Cedrón (2011), los ficheros tenían que manipularse para obtener un formato adecuado para su estudio. Witness proporciona los datos de salida desordenados y no calcula medias ni intervalos de confianza de la media. Sin embargo, ahora, mediante fórmulas de Excel se obtiene de forma instantánea un fichero que recoge ordenadamente las variables de salida del modelo.

El fichero creado en este proyecto, calcula además de forma automática la media y los intervalos de confianza para la media de las variables de salida del modelo. De tal forma que el análisis de resultados se hace casi instantáneo. El usuario solo tiene que pegar los datos que proporciona Witness como salida en la primera página del Excel y después los resultados se ordenan y calculan de forma automática mediante formulas preprogramadas en las restantes hojas del Excel.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	SITUATION TITLES											
2	1,"esc"											
3	PART											
4	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Camion_descargar",	0,	1.300000e+002,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	1.300000e+002,	6.89
5	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Tractor_descargar",	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
6	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Tren_saliente",	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
7	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Contenedor",	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
8	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Tren_entrante",	0,	3.000000e+001,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	3.000000e+001,	3.000000
9	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Plataforma",	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
10	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Camion_cargar",	0,	1.920000e+002,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	1.920000e+002,	1.01760
11	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Tractor_cargar",	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000
12	BUFFER											
13	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_E_S_V Espera_entrada_terminal",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000
14	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_C_D Cam_gen_esp",	-1,	1.300000e+002,	0.000000e+000,	130,	1.300000e+002,	0.000000e+000,	6.890000e+001,	5.300
15	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_TP_D Tract_gen_esp",	-1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
16	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_E_S_V Area_aparc_entrante",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
17	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_E_S_V Area_aparc_saliente",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
18	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M1_CD_GM Playa_LP Almacenamiento_aux",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
19	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M1_CD_GM Playa_LP Espera_aux",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
20	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M1_CD_GM Playa_LP Playa_LP",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
21	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_E_S_T.Via_entrada Esp_entrada_terminal",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
22	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_T_E Esp_illeg_tren_desca",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
23	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M1_CD_GM.Via_esp_desca_tren",	-1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
24	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_E_S_T.Loco_ini.Via_mango_loco_elec",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
25	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M1_CD_GM.Via_esp_desca_aux",	-1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
26	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_C_C Cam_gen_esp",	-1,	1.920000e+002,	0.000000e+000,	192,	1.920000e+002,	0.000000e+000,	1.017600e+002,	5.300
27	1,	1,	1,	1.010000e+003,"Agrupa_TP_C Tract_gen_esp",	-1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
28	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M2_CD_GM Playa_LP Almacenamiento_aux",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
29	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M2_CD_GM Playa_LP Espera_aux",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
30	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M2_CD_GM Playa_LP Playa_LP",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
31	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M2_CD_GM.Via_esp_desca_aux",	-1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
32	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M2_CD_GM.Via_esp_desca_tren",	-1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.00
33	MACHINE											
34	1,	1,	1,	1.010000e+003,"M4_CD_GM Playa_LP Buzon_carga_esp_entr LP",	1,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	1.000000e+002,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000e+000,	0.000000

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q
1	Variables de Salida																
2																	
3	Productividad																
4																	
5	Número de camiones a cargar atendidos								Número de camiones a descargar atendidos								
6	Repetición 1			0,00	camiones	0	Repetición 1			0,00	camiones						
7	Repetición 2			0,00	camiones	0	Repetición 2			0,00	camiones						
8	Repetición 3			0,00	camiones	0	Repetición 3			0,00	camiones						
9	Repetición 4			0,00	camiones	0	Repetición 4			0,00	camiones						
10	Repetición 5			0,00	camiones	0	Repetición 5			0,00	camiones						
11	Repetición 6			0,00	0	Repetición 6				0,00	0						
12	Repetición 7			0,00	0	Repetición 7				0,00	0						
13	Repetición 8			0,00	0	Repetición 8				0,00	0						
14	Repetición 9			0,00	0	Repetición 9				0,00	0						
15	Repetición 10			0,00	0	Repetición 10				0,00	0						
16	Media			153,00	camiones		Media										camiones
17	Desviación típica			0,00			Desviación típica										
18	Ancho intervalo confianza			---			Ancho intervalo confianza										---
19																	
20	Número de tractores a cargar atendidos								Número de tractores a descargar atendidos al día								
21	Repetición 1			0,00	tractores		Repetición 1			0,00	tractores						
22	Repetición 2			0,00	tractores		Repetición 2			0,00	tractores						
23	Repetición 3			0,00	tractores		Repetición 3			0,00	tractores						
24	Repetición 4			0,00	tractores		Repetición 4			0,00	tractores						
25	Repetición 5			0,00	tractores		Repetición 5			0,00	tractores						
26	Repetición 6			0,00	0	Repetición 6				0,00	0						
27	Repetición 7			0,00	0	Repetición 7				0,00	0						
28	Repetición 8			0,00	0	Repetición 8				0,00	0						
29	Repetición 9			0,00	0	Repetición 9				0,00	0						
30	Repetición 10			0,00	0	Repetición 10				0,00	0						
31	Media				tractores		Media				tractores						
32	Desviación típica						Desviación típica										
33	Ancho intervalo confianza			---			Ancho intervalo confianza										---
34																	
35	Número de vehículos (a cargar y a descargar) atendidos								% de movimientos directos entre modos								
36	Repetición 1			0,00	vehículos		Repetición 1			#DIV/0!	%						
37	Repetición 2			0,00	vehículos		Repetición 2			#DIV/0!	%						
38	Repetición 3			0,00	vehículos		Repetición 3			#DIV/0!	%						
39	Repetición 4			0,00	vehículos		Repetición 4			#DIV/0!	%						
40	Repetición 5			0,00	vehículos		Repetición 5			#DIV/0!	%						
41	Repetición 6			0,00	0	Repetición 6				#DIV/0!	%						
42	Repetición 7			0,00	0	Repetición 7				#DIV/0!	%						
43	Repetición 8			0,00	0	Repetición 8				#DIV/0!	%						
44	Repetición 9			0,00	0	Repetición 9				#DIV/0!	%						
45	Repetición 10			0,00	0	Repetición 10				#DIV/0!	%						
46	Media				vehículos		Media				23,43	%					
47	Desviación típica						Desviación típica				0,17						
48	Ancho intervalo confianza			---			Ancho intervalo confianza				0,35						
49																	
50	Número de traxes entrantes atendidos en zona de CD								Número de traxes salientes atendidos en zona de CD								
51	Repetición 1			0,00	traxes		Repetición 1			0,00	traxes						
52	Repetición 2			0,00	traxes		Repetición 2			0,00	traxes						
53	Repetición 3			0,00	traxes		Repetición 3			0,00	traxes						
54	Repetición 4			0,00	traxes		Repetición 4			0,00	traxes						

Figura 5.21 Ejemplo del fichero de salida que se obtiene de Witness y del fichero de variables de salida

Fuente: *elaboración propia*

A continuación, se ofrece una lista detallada de las variables de salida:

- Productividad
 - Número de camiones a cargar y descargar atendidos.
 - Número de tractores de terminal a cargar y descargar atendidos.
 - Número total de vehículos a cargar y descargar atendidos.
 - Porcentaje de movimientos directos entre modos.
 - Número de trenes entrantes y salientes atendidos en zona de carga y descarga.
 - Número medio de contenedores por tren entrante y saliente.
 - Número de trenes entrantes y salientes atendidos en la zona de clasificación.
 - Número de plataformas atendidas en zona de clasificación.
 - Número de trenes intercambiados entre zonas.
- Nivel de servicio
 - Porcentaje de camiones que esperan antes de entrar en la terminal.
 - Número máximo de camiones que esperan antes de entrar en la terminal de forma simultánea.
 - Tiempo medio de espera antes de entrar en la terminal.
 - Número de veces que la puerta de entrada se bloquea
 - Tiempo medio de estancia dentro de la terminal para los camiones y tractores a cargar y descargar.
 - Número de trenes entrantes que esperan antes de entrar en la zona de carga y descarga.
 - Tiempo medio de espera antes de entrar en la zona de carga y descarga.
 - Número de trenes salientes que salen con retraso de la zona de carga y descarga por falta de capacidad de la terminal.
 - Duración media del retraso en la zona de carga y descarga.
 - Duración máxima del retraso en la zona de carga y descarga.



- Tiempo medio de descarga de un tren (desde que puede dar inicio la descarga de un tren hasta que finaliza la descarga el último contenedor).
- Tiempo medio de carga de un tren (hasta que finaliza la carga el último contenedor).
- Número de trenes entrantes que esperan antes de entrar en la zona de clasificación.
- Tiempo medio de espera antes de entrar en la zona de clasificación.
- Número de trenes salientes que salen con retraso de la zona de clasificación por falta de capacidad de la terminal.
- Duración media del retraso en la zona de clasificación.
- Duración máxima del retraso en la zona de clasificación.
- Tiempo medio de estancia de las plataformas en la zona de clasificación.

Uso de los recursos de la terminal

- Grúas móviles
 - Disponibilidad de cada grúa móvil respecto al tiempo de la simulación.
 - Uso de las grúas móviles en movimientos no relacionados con desplazamientos por los PATH.
 - Uso de las grúas móviles en movimientos por los PATH.
 - Porcentaje de tiempo improductivo por averías de cada grúa móvil.
 - Uso total de las grúas móviles respecto al tiempo disponible.
 - Número de camiones y tractores cargados y descargados por cada grúa móvil.
- Tractor de plataformas
 - Disponibilidad de los tractores de maniobras respecto al tiempo de simulación.

- Uso de los tractores de maniobras en tareas no relacionadas con movimientos por los PATH.
- Uso de los tractores de maniobras en movimientos por los PATH.
- Porcentaje de tiempo improductivo por averías de los tractores de maniobras.
- Uso total de los tractores de maniobras respecto al tiempo disponible.

Uso de las infraestructuras

- Puerta de entrada y salida
 - Disponibilidad de las puertas de entrada y salida respecto al tiempo de simulación.
 - Uso de las puertas de entrada y salida respecto al tiempo disponible.
- Área de aparcamiento
 - Número de vehículos que esperan.
 - Número máximo de vehículos que esperan de forma simultánea.
 - Tiempo medio de espera.
 - Tiempo máximo de espera.
- Vías
 - Uso de las vías de entrada y salida de la zona de carga y descarga.
 - Uso de las vías de expedición/recepción.
 - Uso de las vías de espera/carga/descarga.
 - Uso de las vías de entrada y salida de la zona de clasificación
 - Uso de las vías de clasificación.
- Playas de almacenamiento
 - Número de contenedores que han pasado por las playas.

- Porcentajes de ocupación respecto a la capacidad máxima observada a lo largo de la simulación.
 - Tiempo medio de espera en las playas.
 - Número de dobles manipulaciones realizadas.
- Puntos de carga/descarga de los camiones y tractores situados cerca de las playas de almacenamiento y de las vías de carga/descarga.
 - Número máximo de vehículos esperando en las proximidades de las playas.
 - Número máximo de vehículos esperando en las proximidades de las vías.

5.5 Verificación y validación del modelo de simulación

Como ya se comentó en el apartado 3.2 los procesos de verificación y validación del modelo han de llevarse a cabo durante todo el desarrollo del modelo de simulación.

La verificación, consiste en determinar si el modelo funciona de acuerdo a las especificaciones que se definieron en el modelo conceptual, es decir, es un proceso mediante el cual se comprueba que la programación del modelo se ha hecho siguiendo la estructura del modelo conceptual.

Por otro lado, la validación trata de averiguar si el modelo conceptual es una traducción adecuada del sistema real, de forma que los resultados obtenidos durante la simulación permitan obtener conclusiones útiles para el análisis del sistema representado.

Existen una gran variedad de técnicas documentadas para llevar a cabo el proceso de verificación del modelo [Law y Kelton, 2000], y a continuación, se exponen las técnicas utilizadas en este proyecto:



- Al comenzar a representar los elementos y procesos del modelo, se usaron modelos sencillos para poder comprobar que las representaciones que se hacían eran lo suficientemente apropiadas y fieles al sistema real.
- Además, con esta técnica se podían estudiar y comprender mejor todas las posibilidades de programación que ofrecían los elementos, funciones, distribuciones, etc. de Witness.
- La simulación paso a paso que ofrece Witness, unido a la posibilidad de seguir el desarrollo de la simulación de forma visual en la ventana de representación de los elementos, fue una técnica muy útil para seguir, por ejemplo, el flujo de los trenes por la terminal, de manera que podían detectarse errores en el desarrollo de las operaciones.
- Los prototipos creados en la fase anterior se fueron complicando y verificando de forma progresiva e incremental para representar procesos y elementos más grandes y complejos.
- La ejecución de varias configuraciones diferentes para un mismo proceso y el análisis de sus variables de salida, permitía llevar a cabo análisis de sensibilidad del modelo, de forma que se podía comprobar la respuesta que éste tenía a las variaciones en tiempos de operación, cantidad de recursos, etc.
- El uso de simulaciones largas donde interactúan diferentes procesos y aleatoriedades, unido al análisis crítico de los resultados que aporta el modelo, permitió depurar aún más el código programado.
- El uso de variables de seguimiento en los procesos, también ha sido una técnica muy utilizada. Consiste en añadir variables que almacenen datos relevantes de la simulación. Siguiendo la simulación y observando los cambios de estas variables de seguimiento, se podía saber, comparando los datos que



se obtenían de la simulación con cálculos hechos de forma manual, si el modelo hacía las cosas tal y como se habían diseñado. Con esta técnica, se podía comprobar que las distribuciones y proporciones introducidas en el modelo se usaban de forma correcta, que los tiempos de estancia de trenes y de plataformas en la terminal eran correctos, etc.

En cuanto a la validación, ya se comentó en el apartado 3.2 que era una etapa de gran dificultad en un estudio de simulación y más cuando el sistema a representar no es único, sino un conjunto muy variado de sistemas donde pueden variar distintas características de diseño y de operación. En este proyecto, se ha contrastado el modelo conceptual con la información recogida en varias páginas (web sobre terminales ferroviarias, web de ADIF, de contenedores, web de puertos del estado, etc.), y con la información recogida en varias publicaciones científicas (por ejemplo: Marinov, M. y Viegas, J., 2009, Macharis, C y Bontekoning, Y.M., 2004). En este punto, considero que podría haberse hecho una validación más completa, por ejemplo, si hubiera dispuesto de datos reales con los que alimentar el modelo y de datos reales sobre ciertas variables de salida con los que comparar los resultados obtenidos tras simular.

Capítulo 6. Casos de estudio

En este capítulo, detallamos la metodología de trabajo y los tres escenarios que se han analizado mediante la herramienta de simulación construida en este PFC.

En el primer escenario se explican los objetivos que se pretenden alcanzar, una descripción de la terminal considerada como objeto de estudio (recursos, infraestructuras, demanda, etc.) y el análisis de los resultados obtenidos tras la simulación.

El análisis de estos resultados permite identificar posibles incidencias y problemas que afectan a los recursos, a las infraestructuras, o a la operación de la terminal (cuellos de botella, recursos ociosos, etc.). A partir del análisis de estas incidencias se diseñarán varias propuestas de mejora y se procederá a simularlas y a evaluarlas determinando el impacto que provocan en el funcionamiento de la terminal (véanse los escenarios 2 y 3).

6.1 Metodología de estudio

El procedimiento seguido para el análisis del caso simulado en el proyecto consta de los siguientes pasos:

- Definición de los objetivos del caso.

Al comienzo del caso, se explican los objetivos, para tener una idea clara de lo que se quiere analizar en la terminal.

- Descripción de la terminal.

A continuación, se detallan los recursos e infraestructuras que conforman la terminal, se identifican los modos de operación, horarios de trabajo, etc. que serán configurados en el fichero de parametrización.

- Generación del plan de trenes.

Posteriormente, tras establecer las características de la terminal, es necesario introducir los datos del plan de trenes en el fichero de parametrización. En particular, para cada uno de los trenes que se atienden en la terminal, se define la fecha y hora de llegada o salida, su procedencia, su destino, el número de plataformas que transporta, el número, tamaño y peso de los contenedores que transporta cada plataforma, etc.

- Llegada de vehículos a la terminal.

Después de detallar el plan de trenes, se establecen los parámetros para la llegada de vehículos a la terminal.

- Diseño de experimentos.

Posteriormente, después de haber completado el fichero de parametrización hacemos un diseño de experimentos. El hecho de que se puedan utilizar variables de entrada aleatorias para alimentar el modelo (proporción de trenes que llegan con adelanto/retraso, tasa de adelanto/retraso, tiempo de operación de las grúas etc.), da lugar a variables de salida igualmente aleatorias, por lo que los resultados obtenidos tras simular una única vez el escenario no son representativos del funcionamiento del sistema. Debido a ello, se han realizado diez repeticiones de cada escenario, tras lo cual se ha realizado un estudio estadístico de las variables de salida, calculando valores medios e intervalos de confianza a partir de los datos de las 10 repeticiones. Los intervalos de confianza para la media de cada variable de salida tienen un nivel de cobertura determinado " $1-\alpha$ ", de manera que si se construyen 100 intervalos, la media real de cada variable de salida estaría en un " $1-\alpha$ " % de los

intervalos de confianza calculados. Los intervalos de confianza para la media se calculan según la siguiente fórmula:

$$\bar{X}_n \pm t_{n-1, 1-\alpha/2} \sqrt{\frac{S_{n-1}^2}{n}}$$

El primer dato de la fórmula, hace referencia a la media obtenida para cada variable de salida usando los datos de las 10 repeticiones. El valor “t”, se obtiene de la distribución -t de Student. “S”, hace referencia a la desviación típica respecto a la media de los datos observados y “n”, representa el número de repeticiones que se han simulado, que, en nuestro caso, es 10.

Tras estudiar los datos de las diez repeticiones de varias variables de salida, se puede decir que el número de simulaciones realizadas (10 en nuestro proyecto) es suficiente por la escasa dispersión de los datos obtenidos en torno a la media.

- Se han calculado intervalos de confianza sólo para aquellas variables de salida que se supone que siguen distribuciones normales, esto garantiza que la cobertura experimental del intervalo es próxima a su cobertura teórica (1- α). La distribución normal se utiliza para representar variables que indican errores tipificados de diversas clases (por ejemplo, porcentaje de trenes que salen con retraso de la terminal) o cantidades que se calculan como la suma de otras cantidades (por ejemplo, tiempo medio de utilización de las vías de entrada/salida: $[(t_{\text{tren}_1} + t_{\text{tren}_2} + \dots + t_{\text{tren}_n})/n]$). Para alcanzar un nivel de cobertura global de (1- α) en un estudio de simulación en el que se analizan varias variables de salida (es decir, que todas las medias estén de forma simultánea dentro de su intervalo de confianza en el (1- α) % de los casos), hemos definido un “ α ” individual para cada intervalo de confianza igual a “ α/k ”, donde “k” es el número de variables de salida a analizar de forma simultánea. Usando un α individual de 0,01 y considerando que el número de

variables de salida a analizar está en torno a 20, podemos alcanzar un nivel de cobertura global en torno al 80%.

- Alternativas de mejora. Propuestas.

Después del análisis de las variables de salida del escenario simulado, se puede determinar el grado de uso de los recursos e infraestructuras de la terminal y el nivel de servicio que ésta ofrece; se pueden diagnosticar las situaciones en las que el modelo no funcionan de la forma deseada y definir las debilidades de nuestro escenario de estudio (cuellos de botella, bajo nivel de atención a los trenes que llegan a la terminal, etc.). En función de este estudio se define una serie de mejoras en la terminal y se implementan modificando los datos correspondientes en el fichero de parametrización. Posteriormente se procede a realizar una nueva simulación (con sus 10 repeticiones por escenarios de mejora) y se obtienen las nuevas variables de salida.

- Comparación de las variables de salida del escenario inicial con el escenario mejorado.

Después de obtener las variables de salida de cada caso, se ha llevado a cabo un proceso de comparación de medias. Para comparar las medias de dos variables de salida, se ha utilizado intervalos de confianza Paired-t, ya que en la simulación de los escenarios, se usan las mismas semillas en la configuración inicial y en el escenario mejorado y por tanto, existe correlación entre ellos. Lo que se comprueba con este método de análisis, es si existe una diferencia estadísticamente significativa entre los resultados de dos escenarios diferentes. En la comparación de medias, no existe evidencia para rechazar la hipótesis de diferencia entre ambos escenarios si el cero está dentro del intervalo de confianza.

6.2 Escenario 1

Para este caso, el objetivo es ver si la terminal es capaz de hacer frente a la carga de trabajo a la que se le somete. Tras la simulación, se analizarán los resultados obtenidos para realizar propuestas de mejora.

6.2.1 Situación inicial

La terminal que se estudia en este caso tiene una zona de carga/descarga de trenes y camiones y una zona de clasificación de plataformas con las siguientes características, ordenadas según las hojas del fichero de parametrización MS Excel:

Hoja Zona CD Infra. Infraestructuras y condiciones de operación de la zona de carga/descarga

- El horario de apertura de la puerta de entrada de camiones es de lunes a viernes de 8:00 a 19:30 mientras que el horario de apertura de la puerta de salida de camiones es de lunes a viernes de 8:00 a 20:00. La llegada de los camiones es coherente con este horario. Se han utilizado distribuciones triangulares para generar el tiempo de operación de la puerta de entrada y salida.
- Hay una capacidad para 6 camiones en la zona de aparcamiento y pueden circular hasta 18 a la vez por la terminal.
- Hay una vía de entrada y otra de salida en la zona de carga/descarga y están operativas 24 horas al día, los 7 días de la semana. El tiempo de entrada y salida de los trenes se genera mediante distribuciones triangulares.
- En la zona de carga/descarga hay 2 vías de recepción/expedición.



- Hay 6 puntos de carga/descarga de vehículos tanto cerca de la playa como cerca de las vías de carga/descarga.
- La terminal tiene sólo una playa con 3 filas y 49 hileras para contenedores de 20 pies. Los contenedores se pueden apilar hasta en 3 alturas siguiendo un almacenamiento preferente en altura. De esta forma, la playa puede almacenar hasta 441 TEUs ($3 \times 49 \times 3$).
- La terminal posee una vía de carga/descarga con capacidad para albergar 21 plataformas de 60 pies.
- Los trenes salientes empiezan a ser cargados 5 horas antes de su hora de salida y la carga se cierra 1 hora antes. Los trenes entrantes son descargados tan pronto como llegan a la terminal.

Hoja Zona CD GM. Equipos de la zona de carga/descarga.

- La terminal tiene una única grúa móvil, trabaja de 8:00 a 19:30 de lunes a viernes y se supone que no se avería.
- Los tiempos de extracción/colocación de contenedores de/sobre un vehículo de extracción/colocación de contenedores de/sobre la plataforma de un tren de extracción/colocación de contenedores de/en la playa de almacenamiento se generan mediante distribuciones triangulares.



Hoja Zona _Clasif. Infraestructuras y condiciones de operación de la zona de clasificación.

- Hay una vía de entrada/salida y 10 vías de clasificación.
- La entrada/salida de trenes, la retirada/colocación de la locomotora y la inspección previa/posterior a la clasificación se pueden hacer 24 horas al día, 7 horas al día.
- Pueden trabajar hasta 2 tractores de maniobras a la vez sin sufrir interferencias
- Los trenes entrantes se clasifican tan pronto como llegan a la terminal para evitar retrasos respecto a su hora de salida.

Hoja TractoresM. Recursos compartidos entre la zona de carga/descarga y la zona de clasificación. Tractores de maniobra.

- La terminal tiene 2 tractores de maniobras que trabajan 24 horas al día, de lunes a viernes. Ambos pueden trabajar en las dos zonas que posee la terminal (zona de clasificación y zona de carga/descarga).
- Se supone que los tractores no sufren averías.
- El tiempo para desenganchar el tractor de un conjunto de plataformas, el tiempo para enganchar el tractor a un conjunto de plataformas, el tiempo para mover las plataformas de un tren desde las vías de recepción/expedición a las vías de carga/descarga y viceversa y el tiempo para clasificar plataformas se generan mediante distribuciones triangulares.



Hoja Demanda: llegada/salida de trenes y camiones

- La terminal intercambia carga con 3 terminales y trabaja con trenes de un único cliente. Los contenedores que transporta cada tren pueden ser de cinco clientes distintos, es decir, la terminal trabaja con trenes de tipo multicliente.
- En particular, hay 15 trenes entrantes y 15 trenes salientes que son atendidos semanalmente por la terminal. Además, hay un tren diario que sale por la mañana de la zona de clasificación hacia la zona de carga/descarga y que vuelve por la noche de la zona de carga/descarga a la zona de clasificación. Todos estos trenes aparecen representados en la siguiente tabla, junto a las horas de entrada y salida de cada tren y la terminal de origen y destino de cada uno de ellos. La longitud de los trenes es de 18, 20 ó 24 plataformas de 60 pies para los trenes entrantes (representados por la letra “E” en la tabla) y de 18, 20 ó 24 para los trenes salientes (representados por la letra “S” en la tabla) . Las 6 últimas plataformas de cada tren entrante transportan con contenedores que van a salir en camión. Por tanto, estas plataformas serán las que irán a la zona de carga/descarga en el tren TcI-Tcd para ser descargadas y volverán con otros contenedores distintos en el tren Tcd-TcI para salir después en otro tren saliente.

	L	M	X	J	V	S
0:05	E-4 ①	E-4 ②	E-4 ③	E-4 ④	E-4 ⑤	
0:34	E-3 ①	E-3 ②	E-3 ③	E-3 ④	E-3 ⑤	
1:43	S-3 ⑤	S-3 ①	S-3 ②	S-3 ③	S-3 ④	
4:10		S-4 ①	S-4 ②	S-4 ③	S-4 ④	S-4 ⑤
7:00	Tcl-Tcd ①	Tcl-Tcd ②	Tcl-Tcd ③	Tcl-Tcd ④	Tcl-Tcd ⑤	
21:30	Tcd-Tcl ①	Tcd-Tcl ②	Tcd-Tcl ③	Tcd-Tcl ④	Tcd-Tcl ⑤	
22:00	S-2 ⑤	S-2 ①	S-2 ②	S-2 ③	S-2 ④	
23:18	E-2 ①	E-2 ②	E-2 ③	E-2 ④	E-2 ⑤	

Tabla 6.1 Plan de trenes de la estación simulada

Fuente: *elaboración propia*

Los trenes E2, E3 y E4 llegan a la zona de clasificación y su composición es la siguiente:

- E-2, tiene 20 plataformas:
 - 4 serán colocadas en el tren S-3
 - 10 serán colocadas en el tren S-4
 - 6 serán descargadas en la zona de carga/descarga y sus contenedores saldrán posteriormente en camión
- E-3, tiene 18 plataformas:
 - 4 serán colocadas en el tren S-2
 - 8 serán colocadas en el tren S-4
 - 6 serán descargadas en la zona de carga/descarga y sus contenedores saldrán posteriormente en camión



- E-4, tiene 24 plataformas:
 - 8 serán colocadas en el tren S-3
 - 10 serán colocadas en el tren S-2
 - 6 serán descargadas en la zona de carga/descarga y sus contenedores saldrán posteriormente en camión
- Se genera un tren Tcl-Tcd al día, de L a V. El tren Tcl-Tcd tiene 18 plataformas y se compone de:
 - 6 plataformas de E-2
 - 6 plataformas de E-4
 - 6 plataformas de E-3

La composición de los trenes salientes S-2, S-3 y S-4 es la siguiente:

- Se genera un tren Tcd-Tcl al día de L a V. El tren Tcd-Tcl tiene 18 plataformas, las que fueron descargadas en la zona de carga/descarga y que ahora vuelven cargadas a la zona de clasificación para salir en:
 - 6 plataformas en S-2
 - 6 plataformas en S-4
 - 6 plataformas en S-3
- S-2, tiene 20 plataformas:
 - 10 plataformas procedentes del tren E-4
 - 4 plataformas procedentes del tren E-3
 - 6 plataformas procedentes de la zona de carga/descarga
- S-3, tiene 18 plataformas:
 - 4 plataformas procedentes del tren E-2
 - 8 plataformas procedentes del tren E-4
 - 6 plataformas procedentes de la zona de carga/descarga

- S-4, tiene 24 plataformas:
 - 10 plataformas procedentes del tren E-2
 - 8 plataformas procedentes del tren E-3
 - 6 plataformas procedentes de la zona de carga/descarga
- El patrón de llegada para los camiones a cargar se genera mediante distribuciones exponenciales. Los camiones comienzan a llegar desde primera hora de la mañana del día en que llega el tren a Tcd-Tcl con el que están relacionados. En un par de días salen en camión todos los contenedores que llegaran previamente en tren.
- El patrón de llegada para los camiones a descargar se genera mediante distribuciones exponenciales también. Los camiones comienzan a llegar con un día de antelación respecto a la salida del tren Tcd-Tcl con el que están relacionados. Sin embargo, la mayor parte de los camiones a descargar llegan el mismo día en el que se produce la salida de ese tren.

6.2.2 Resultados del Escenario 1

Este primer escenario se ha simulado durante 3 semanas, siendo la primera de tiempo de calentamiento. Este tiempo de calentamiento permite al modelo alcanzar el régimen estacionario de funcionamiento. El modelo se ejecuta de manera normal durante la primera semana, sin embargo los valores de las variables de salida no son registrados hasta comenzar la segunda semana. Como se ha comentado en el apartado anterior, debido a la gran cantidad de datos de entrada aleatorios, se han llevado a cabo 10 repeticiones del escenario.

Los resultados de la simulación, se han desglosado en dos bloques: resultados relativos a la zona de carga/descarga de trenes y resultados relativos a la zona de clasificación. A su vez, estos bloques se han desglosado en otros dos, uso de los recursos e infraestructuras y nivel de servicio. Para cada variable de salida,

se ha calculado la media de los valores observados en las 10 repeticiones, su desviación típica y el intervalo de confianza para la media (si procede), con un nivel de cobertura del 99% ($\alpha=0.01$).

Zona carga/descarga. Nivel de servicio.

En la tabla 6.2 que se muestra a continuación se observa el nivel de servicio de la zona de carga/descarga. El número de camiones que esperan antes de entrar en la terminal es, en media, de 12,80 camiones y, en media, esperan 0,82 minutos para entrar en la terminal.

<i>Variable de salida</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación Típica</i>	<i>Ancho Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$</i>
Número de camiones que esperan antes de entrar en la terminal	12.80	2.62	-
Tiempo medio de espera de los camiones antes de entrar en la terminal (min)	0.82	0.12	[9.40, 1.00]
Tiempo medio de estancia dentro de la terminal de los camiones a cargar (min)	12.00	0.09	[11.86, 12.14]
Tiempo medio de estancia dentro de la terminal de los camiones a descargar (min)	9.53	0.09	[0.64, 9.66]
Número de camiones que esperan antes de salir de la terminal	1.10	0.88	-

Tabla 6.2 Nivel de servicio de la zona carga/descarga

Fuente: *elaboración propia*

El nivel de servicio en la zona de carga/descarga es bueno. Este se explica por la baja utilización de recursos e infraestructuras como se puede ver en a continuación.

Zona de carga/descarga. Uso de recursos e infraestructuras

En la siguiente tabla se puede ver el uso de los diferentes recursos e infraestructuras de la zona carga/descarga. El uso de la grúa móvil es en media un 31,2% de su tiempo disponible.

Se puede observar que las infraestructuras de la terminal tienen poco uso en valores medios. La puerta de entrada y de salida tienen un uso en media de menos del 5%. El uso de las vías de entrada y de salida es incluso aun más bajo, un 0,25% para ambos casos. Las vías de recepción/expedición no se utilizan ya que los trenes no entran directamente a la zona de carga/descarga sino que entran por la zona de clasificación. La vía de carga/descarga se utiliza casi un 40%, en la tabla se puede apreciar que es el recurso que más se utiliza de la zona de carga/descarga.

La playa de almacenamiento de contenedores se ha ocupado en media hasta un 8,41% de su capacidad máxima, han pasado casi 177 contenedores por ella y se han tenido que hacer 19,4 dobles manipulaciones.

El número máximo de vehículos que esperan a ser cargados/descargados de forma simultanea cerca de la playa de almacenamiento y cerca de la vía de carga/descarga es, en media, 3,3 y 3 respectivamente cuando la capacidad máxima de cada área de carga/descarga es de 6 camiones.

<i>Variable de salida</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación Típica</i>	<i>Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$</i>
Uso de la grúa móvil (%)	31.24	0.09	[31.15, 31.33]
Uso de la puerta de entrada (%)	4.34	0.05	[4.29, 4.29]
Uso de la puerta de salida (%)	3.3	0.04	[3.26, 3.34]
Uso de la vía de entrada (%)	0.25	0.01	[0.24, 0.26]
Uso de la vía de salida (%)	0.25	0.01	[0.24, 0.26]
Uso de las vías de recepción/expedición (%)	0	0	0
Uso de la vía de carga/descarga (%)	39.98	0.13	[39.85, 40.11]
Ocupación máxima de la playa de almacenamiento (%)	8.41	0.12	[8.29, 8.53]
Número de contenedores que han pasado por la playa de almacenamiento	176.9	0.32	-
Número de dobles manipulaciones	19.4	1.9	-
Número máximo de vehículos que esperan ser cargados/descargados de forma simultanea en la playa de almacenamiento	3.3	0.48	-
Número máximo de vehículos que esperan ser cargados/descargados de forma simultanea en la vía de carga/descarga	3	0	-

Tabla 6.3 Uso de recursos e infraestructuras de la zona carga/descarga

Fuente: *elaboración propia*

Zona de clasificación. Nivel de servicio.

La siguiente tabla muestra un buen nivel de servicio en la zona de clasificación de la terminal.

Las vías de clasificación han atendido a 39 trenes entrantes y 38 trenes salientes (al finalizar la simulación queda un tren en la terminal que saldrá el lunes de la 4ª semana y por tanto, no se contabiliza su salida) y 800 plataformas (véase la tabla 6.4). Esto quiere decir que se han atendido todos los trenes que había en el plan de trenes en el periodo de tiempo simulado. Además, la simulación revela que

no ha habido retraso en ninguno de los trenes para ninguna de las repeticiones, (véase tabla 6.4). En el caso de que algún tren hubiese salido con retraso, se ha programado que se genere un archivo .txt en la misma carpeta donde está guardado el modelo con el tren que ha salido tarde y el retraso concreto que ese tren ha sufrido.

Variable de salida	Media	Desviación Típica	Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$
Número de trenes entrantes atendidos en la zona de clasificación	39	0	-
Número de trenes salientes atendidos en la zona de clasificación	38	0	-
Número de plataformas atendidas en zona de clasificación	800	0	-
Duración media del retraso de la zona de clasificación	0	0	-

Tabla 6.4 Nivel de servicio de la zona de clasificación

Fuente: *elaboración propia*

A pesar de este buen nivel de servicio, podemos ver que ha habido 10 dobles manipulaciones en la zona de clasificación.

Estas dobles manipulaciones vienen dadas por no llegar las plataformas ordenadas tal y como se tienen que entregar en destino. En la figura 6.1 se puede ver un ejemplo. El tren con destino 3 (el tren S-3 de la tabla 6.1) se forma a partir de trozos de los trenes con origen 2 (E-2), 4 (E-4) y zona carga/descarga (Tcd-Tcl). Las plataformas que forman el tren con destino 3 llegan de la siguiente forma. Primero llegan las plataformas del tren con origen 2 (según se pide en destino, estas plataformas deben estar en la parte central del tren). Después llegan las plataformas del tren con origen 4. Estas plataformas deben estar en la cola del tren, por lo que se colocan detrás de las plataformas de origen 2. Por último, llegan las plataformas del tren con origen zona carga/descarga. Estas plataformas no se

pueden colocar al final porque en destino las quieren en la cabeza del tren. Por tanto, el tractor debe mover las plataformas con origen 3 a una vía vacía y luego mover las plataformas con origen 2 y 4 a esa misma vía. El tiempo invertido en mover de segundas las plataformas con origen 2 y 4 es improductivo y es lo que aquí se considera como dobles manipulaciones.

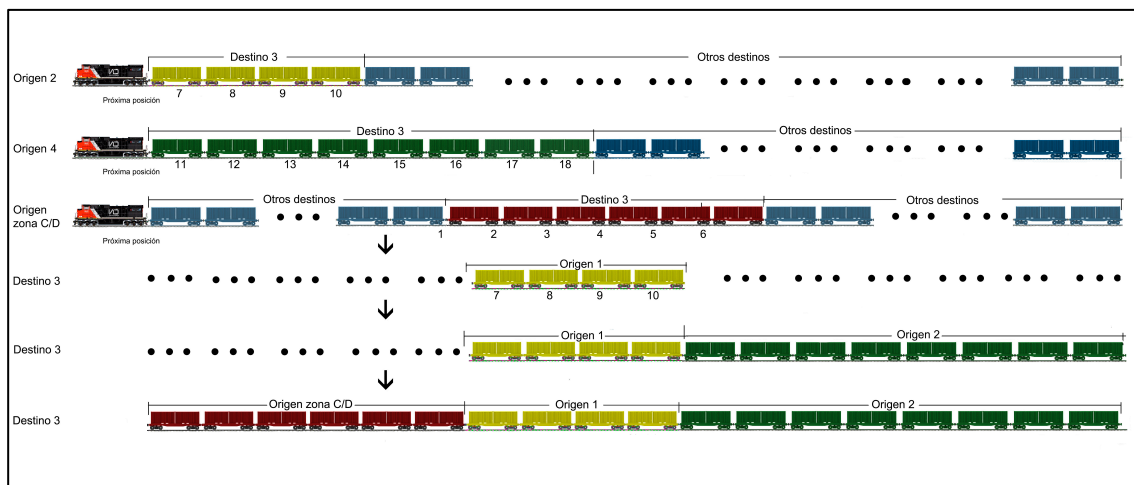


Figura 6.1 Descomposición del tren entrante con origen 2

Fuente: *elaboración propia*

En este caso no se puede evitar porque la zona de clasificación es como se muestra en la figura 6.2. El tractor de maniobras solo puede entrar por el extremo derecho de las vías (vías de entrada/salida) y salir por el mismo sitio.

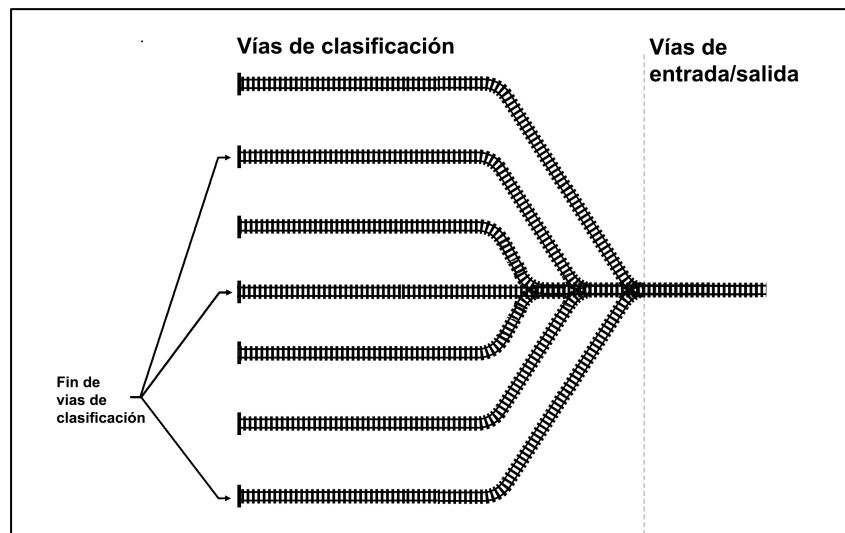


Figura 6.2 Esquema de vías de clasificación/vías de entrada/salida

Fuente: *elaboración propia*

Zona de clasificación. Recursos e infraestructuras

Los tractores de maniobras son realmente recursos compartidos entre la zona de carga/descarga y la zona de clasificación como se ha comentado anteriormente. Se utilizan para clasificar las plataformas de los trenes en la zona de clasificación y para mover trenes entre la zona de clasificación y la zona de carga/descarga y viceversa. Su utilización durante este primer escenario ha sido, en media, del 15,01% para el tractor 1 y del 16,81% para el tractor 2. Este bajo uso se debe al bajo número de trenes que atiende la terminal y a la gran disponibilidad de estos recursos (24h/día, 7 días/semana).

<i>Variable de salida</i>	<i>Media</i>	<i>Desviación Típica</i>	<i>Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$</i>
Uso total del tractor de maniobras 1 respecto al tiempo disponible (%)	15.01	1.73	[13.23, 16.69]
Uso total del tractor de maniobras 2 respecto al tiempo disponible (%)	16.81	1.81	[15.00, 18.62]

Tabla 6.5 Porcentaje del uso total de los tractores de maniobras

Fuente: *elaboración propia*

En general, el uso de las infraestructuras de la zona de clasificación es medio o bajo. La tabla 6.6, muestra el uso de las vías de clasificación. Estas vías están ocupadas, en media, un 41,96% de su tiempo disponible. En la tabla 6.6, también se puede ver que el nivel de uso de las vías de entrada/salida es inferior en media al 1% en ambos casos.

Variable de salida	Media	Desviación Típica	Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$
Uso de las vías de clasificación (%)	41.96	0.01	[41.95, 41.97]
Uso de la vía de entrada de la zona de clasificación (%)	0.97	0.03	[0.93, 1.01]
Uso de la vía de salida de la zona de clasificación (%)	0.94	0.02	[0.91, 0.97]

Tabla 6.6 Uso de las vías de clasificación

Fuente: *elaboración propia*

6.2.3 Conclusiones del Escenario 1

A la vista de los resultados analizados, podemos concluir que el nivel de servicio de la terminal es bueno. Además la mayoría de infraestructuras y recursos situados como en la zona de clasificación y en la zona de carga/descarga tienen capacidad ociosa, lo que indica que puede dar cabida a una mayor carga de trabajo.

De esta forma, en los siguientes escenarios de estudio se realizarán ciertas mejoras para ajustar el uso de los recursos a la carga de trabajo existente.

En este PFC las mejoras se centraran en la zona de clasificación ya que es la zona de aportación original de este trabajo. Para encontrar mejoras que podrían aplicarse a la zona de carga/descarga, puede recurrir al PFC de Jiménez Treitas (2011)

En esta línea, para reducir costes de operación, la terminal podría prescindir de uno de los dos tractores de maniobra. Este tractor podría ser empleado en otra terminal con una mayor carga de trabajo y el operario que lo maneja podría trabajar en otro puesto que sea cuello de botella en esta terminal o en otra.

6.3 Escenario 2

Para llevar a cabo el cambio propuesto en las conclusiones del apartado anterior, no es necesario reprogramar el modelo de simulación, únicamente es necesario realizar el siguiente cambio en el fichero de parametrización, y simular:

Hoja TractoresM. Recursos compartidos entre la zona de carga/descarga y la zona de clasificación. Tractores de maniobra.

- Cambiar el número de tractores. Ahora sólo hay uno que trabaja tanto en la zona de clasificación como en la zona de carga/descarga.

6.3.1 Resultados del Escenario 2

Después de introducir el cambio en el fichero de parametrización se ha simulado el nuevo escenario durante 3 semanas, dejando la primera como tiempo de calentamiento. En este caso también se han llevado a cabo 10 repeticiones.

En la siguiente tabla se puede consultar la comparación de medias entre las variables de salida del Escenario 1 (x_1) y del Escenario 2 (x_2). En la segunda columna de la tabla se indica la media de la variable " Z_j " ($Z_j = X_1 - X_2$). Para calcular ese valor hay que restar uno a uno los valores del escenario 1 para una variable a los valores del escenario 2 y luego calcular la media. En la tercera columna, está el ancho de intervalo de confianza Paired-t al 99% ($\alpha=0.01$) para la media de Z_j y la cuarta columna indica si la diferencia que existe entre ambos escenarios es estadísticamente significativa.

Variable de salida	Media (Z_j)	Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$	Dif. Significativa
Uso total del tractor de maniobras 1 respecto al tiempo disponible (%)	16.54	[12.82, 20.26]	SI
Uso de las vías de clasificación (%)	0.07	[0.063, 0.077]	SI
Número de trenes que salen con retraso de la terminal	0	-	-

Tabla 6.7 Comparación de medias entre el Escenario 2 y el Escenario 1

Fuente: *elaboración propia*

En la tabla 6.7 se puede ver la comparación de medias de ambos escenarios para las tres variables principales. El uso del tractor de maniobras 1 aumenta, en media, un 16,54% en el escenario 2. Este aumento es lógico puesto que se ha pasado de dos tractores en el escenario 1 a solamente un tractor en el escenario 2. El uso de las vías de clasificación también aumenta, en media, un 0,07% en el escenario 2. Esto se debe a que al haber un único tractor de maniobras los trenes que están en la zona de clasificación y tienen que pasar a la zona de carga/descarga deben esperar algo más de tiempo para ser atendidos. Estas esperas no son graves ya que el nivel de servicio no varía, todos los trenes salientes siguen saliendo a la hora especificada en el plan de trenes.

6.3.2 Conclusiones del Escenario 2

Analizando los resultados de este segundo escenario se puede comprobar que ha sido acertada la decisión de quitar uno de los tractores de maniobra. El tractor que queda en la terminal puede asumir, sin causar ningún daño al servicio, toda la carga de la terminal.

Sin embargo, se puede observar que al igual que en el Escenario 1, el tractor tiene que realizar dobles manipulaciones.

Como mejora para el próximo escenario se propone solicitar a las terminales de origen si es posible que las plataformas vengan ordenadas de forma que no sea necesario hacer ninguna doble manipulación.

6.4 Escenario 3

Para el estudio de este escenario, se parte de la configuración del escenario anterior, cambiando el orden de las plataformas con destino 3 (plataformas que conforman el tren saliente S-3) para los trenes E-2, E-3 y E-4. Con este cambio ya no es necesario que el tractor de maniobras haga dobles manipulaciones. Para implementar este cambio, basta con:

Hoja Demanda: llegada/salida de trenes y camiones

- Ordenar las plataformas de los trenes entrantes de forma que no sea necesario hacer dobles manipulaciones.

A continuación hay que lanzar las macros pertinentes para que el plan de trenes se genere en un formato que Witness pueda leer y volver a ejecutar el modelo de simulación.

6.4.1 Resultados del Escenario 3

El tiempo de simulación, el tiempo de calentamiento y el número de repeticiones ha sido el mismo que en los casos anteriores. Al igual, que en el apartado 6.3, en este caso sólo se han analizado las tres variables más relevantes.

En la siguiente tabla se puede ver la comparación de medias entre el Escenario 1 y el Escenario 3. Como se han eliminado las dobles manipulaciones, la utilización del tractor descende, en media, un 2,04%, así como el uso de las vías de clasificación que se reduce, en media, un 0,07%. Como puede verse en la tabla 6.8,

este cambio no afecta al nivel de servicio proporcionado a los trenes. Los trenes siguen saliendo puntuales según el plan de trenes establecido en el fichero de parametrización.

Variable de salida	Media (Z_j)	Intervalo de Confianza $\alpha=0.01$	Dif. Significativa
Uso total del tractor de maniobras 1 respecto al tiempo disponible (%)	-2.04	[-2.107, -1.973]	SI
Uso de las vías de clasificación (%)	-0.07	[-0.0724, -0.0676]	SI
Número de trenes salientes que salen con retraso de la zona de Clasificación	0	-	-

Tabla 6.8 Comparación de medias del Escenario 3 y el Escenario 1

Fuente: *elaboración propia*

6.4.2 Conclusiones del Escenario 3

El porcentaje de uso del tractor de maniobras en el Escenario 3 ha disminuido. Por tanto el tractor de maniobras tiene ahora más tiempo para otras tareas. Esto podría ser interesante si la terminal recibiera más trenes. Podría atenderlos sin necesitar más recursos.

De forma iterativa, se podría seguir mejorando el funcionamiento de la terminal, aplicando mejoras sobre la zona de carga/descarga similares a las indicadas en el PFC de Jiménez Treitas (2011). U otras mejoras sobre la zona de clasificación. Por ejemplo, se podrían ajustar los turnos de trabajo del tractor de tal forma que estuviera disponible menos de 24h/día de L a V sin descuidar sus tareas,

Capítulo 7. Conclusiones y desarrollos futuros

En este capítulo, se exponen las principales conclusiones de este proyecto, así como algunos de los posibles desarrollos futuros de la herramienta de simulación y del fichero de parametrización.

7.1 Conclusiones

A continuación, se encuentran las conclusiones que se derivan del desarrollo del modelo de simulación flexible que se recoge en esta memoria:

- El objetivo del transporte intermodal es realizar cada etapa de la cadena de transporte lo mas eficiente posible para, de esta forma, reducir su coste y disminuir el impacto hacia el medio ambiente.
- El modelo de simulación se puede utilizar para representar una gran variedad de terminales ferroviarias, ya sean compuestas por zona de clasificación y zona de carga/descarga o sólo por una de las dos zonas. Esta flexibilidad viene dada al poder configurar múltiples parámetros de diseño y de operación a través del fichero de parametrización. Además se ha dotado a dicho fichero de explicaciones, vínculos entre hojas, validación de celdas, etc., que facilitan su cumplimentación.
- Los usuarios finales no necesitan conocimientos de programación para utilizar la herramienta ya que la programación del modelo se ha desvinculado totalmente de la configuración de los diferentes parámetros de entrada necesarios. El usuario final únicamente necesita mínimos conocimientos de MS Excel para configurar el modelo de simulación de una terminal y mínimos conocimientos de Witness para ejecutar las simulación.



- La simulación de los diferentes casos de estudios simulados en el capítulo 6 ha sido prácticamente instantánea gracias a que el modelo de simulación empleado era flexible.
- Hay que destacar el alto nivel de dificultad de programar un modelo flexible frente a uno no flexible ya que la herramienta de simulación se ha de programar para tener en cuenta todos los casos posibles que se quieran considerar. Los inconvenientes radican también en que ante un mayor número de casos posibles a programar, mayor es el tiempo que se debe dedicar a la depuración posterior de los errores del modelo. Al depender unos procesos de otros y compartir elementos entre sí, la verificación del código se hace también más laboriosa y difícil a medida que va creciendo el modelo. Por tanto, no es suficiente con verificar los procesos programados de forma aislada, teniendo que realizar simulaciones largas de prueba donde todos los procesos interactúen entre sí.
- El fichero de variables de salida simplifica de manera importante el estudio estadístico de los datos obtenidos en la simulación ya que los datos proporcionados directamente por Witness no son fácilmente entendibles (aparecen sin título, aparecen ordenados por repeticiones, etc.). Haciendo pequeñas modificaciones en el archivo *.csv generado por Witness y gracias al fichero de variables de salida, se obtienen los datos divididos en productividad, uso de infraestructuras y recursos y nivel de servicio junto a su media e intervalo de confianza (si procede), lo que ha llevado a reducir el tiempo de análisis de los resultados en el capítulo de experimentación (capítulo 6).
- Hay ciertas información que Witness no proporciona automáticamente por lo que es necesario incluir algunas variables de salida extra para recoger dicha información, la cual es necesaria para analizar información de aspectos que interesan de la terminal.

De los diferentes casos de estudio recogidos en el capítulo 6, se desprenden varias conclusiones:

- El uso de dos tractores de maniobras en una terminal con una carga tan baja de trabajo no está justificado. Al utilizar sólo uno no merma el servicio de la terminal pues todos los trenes siguen saliendo a su hora establecida según el plan de trenes.
- Si los trenes vienen ordenados directamente desde las terminales de origen, no hace falta hacer dobles manipulaciones por lo que el tiempo de uso del tractor y de su conductor se reduce. Esto puede traducirse en menores averías (si éstas están condicionadas por el tiempo de uso) y en un mejor uso de su conductor (al poder asignarle otras tareas relevantes para la terminal).

7.2 Desarrollos futuros

Los desarrollos futuros de este proyecto son los siguientes:

- Se podría ampliar el enfoque de programación flexible para representar otras terminales no consideradas en este proyecto ni en proyectos anteriores donde intervengan otros modos de transporte no considerados en este documento, como por ejemplo, las terminales marítimas. También podría utilizarse este enfoque flexible para representar terminales ferroviarias situadas en la frontera franco-española donde se intercambian contenedores entre trenes con distinto ancho de vías.
- Se deberían buscar datos reales con los que hacer una validación más exhaustiva de los resultados del modelo.
- Se debería trabajar sobre el display del modelo para hacerlo más atractivo. Este display muestra en detalle el movimiento de tractores por la terminal y la



composición de los trenes cuando están en las vías, pero podría hacerse aún más atractivo reordenando elementos y acercando su vista a la que presentan en el sistema real.

Capítulo 8.- Bibliografía

- Cedrón Domínguez, Borja (2011). Simulación de terminales ferroviarias de transporte intermodal operadas por grúas móviles y pórtico
- CEMT, 2011. Conferencia Europea de Ministros de Transportes. En:
<<http://www.cemt.org/>> (2 Julio 2013)
- Comisión europea, 2013. Programa Marco Polo. En:
Comisión europea, 2013a.
<http://europa.eu/legislation_summaries/transport/intermodality_trans_european_networks/l24159_es.htm> y
Comisión europea, 2013b.
<http://europa.eu/legislation_summaries/environment/tackling_climate_change/l24465_es.htm> (2 Julio 2013)
- G. Lancaster & L. Massingham. 2001. *Essentials of Marketing*. McGraw-Hill Education. 4ª Edition Illustrate. London
<http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/3esohistoria/quincena8/quincena8_contenidos_3d.htm> (8 agosto 2013)
- Instituto de Investigación Tecnológica, 2013. Simulación por eventos discretos. Universidad pontificad de Comillas. En:
<http://www.iit.upcomillas.es/aramos/simio/transpa/t_sim_ac.pdf> (10 Agosto 2013)
- Jiménez Treitas, Jesus (2011). Simulación de terminales ferroviarias de transporte intermodal operadas por grúas móviles
- Law y Kelton, 2000. *Simulation Modeling and Analysis*, 3ª edición, editorial McGrawHill



- Libro Blanco, 2001
Hoja de ruta hacia un espacio único europeo de transporte
<<http://www.upv.es/contenidos/CAMUNISO/info/U0636269.pdf>>
- Macharis, C. y Bontekoning, Y.M. (2003). Opportunities for OR in intermodal freight transport research: A review. *European Journal of Operational Research* 153 (2004) 400–416.
- Marinov, M. y Viegas, J. (2009). *Simulation Modelling Practice and Theory*. Lisboa. Technical University of Lisbon, 17 (6), 1106-1129.
- MCOII, 2010.
Práctica número 2 de la asignatura Métodos Cuantitativos de Organización II. 4º curso de Ingeniería Industrial. Universidad Carlos III de Madrid.
- Ministerio de Educación, Cultura y Deporte, 2013. *La Economía de Europa*
<http://recursostic.educacion.es/secundaria/edad/3esohistoria/quincena8/quincena8_contenidos_3d.htm> (8 agosto 2013)
- Ministerio de Fomento, 2003. El lenguaje del transporte intermodal.
Vocabulario ilustrado. En:
<http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/17FBCF00-91E0-4761-A11C-88A16277D8A4/1550/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf> (9 agosto 2013)
- Ministerio de Fomento, 2008.
Análisis, información y divulgación sobre la aportación del transporte por carretera a la Intermodalidad.
http://www.fomento.es/NR/rdonlyres/17FBCF00-91E0-4761-A11C-88A16277D8A4/1550/01_lenguaje_transporte_intermodal.pdf (10 agosto 2013)

- Ministerio de Fomento, 2011
Observatorio del Transporte intermodal terrestre y marítimo. En:
<http://www.fomento.gob.es/AZ.BBMF.Web/documentacion/pdf/RE372_2011.pdf> (10 agosto 2013)
- Ministerio de Fomento, 2013. Plan estratégico de infraestructuras y transportes. En:
Ministerio de Fomento, 2013a
<http://www.fomento.es/mfom/lang_castellano/_especiales/peit/default.htm>
Ministerio de Fomento, 2013b
<<http://www.fomento.gob.es/MFOMB Prensa/detalleRecurso.aspx?t=i&r=861ccfc1-2324-4aef-cf58-cf93e58c1c1b&p=daf706e5-ec27-4857-a59f-9a490433d30b>>
- Shannon, R. (1976). Systems Simulation: The Art and Science. Nueva York. *ACM SIGSIM Simulation Digest*, 8 (3), 33-38.
- Universidad Autónoma de Madrid, 2013. Sistemas, modelos y simulación. En:
<<http://arantxa.ii.uam.es/~aguirre/OS/sms.pdf>> (12 Agosto 2013)
- Universidad de Sevilla, 2013. El software WITNESS. Universidad de Sevilla, Escuela Técnica Superior de Ingeniería, 2013. En:
<http://bibing.us.es/proyectos/abreproy/4835/fichero/Cap_7.pdf> (12 Agosto 2013)
- Universidad de Valladolid, 2013. Manual básico de WITNESS. Universidad de Valladolid. En:
<https://www5.uva.es/guia_docente/uploads/2012/439/41635/1/Documento.pdf> (18 Agosto 2013)



- Vatic Group, 2013. La simulación de eventos discretos como técnica fundamental en la toma de decisiones de alto impacto. En:
<<http://www.vaticgroup.com/perspectiva-logistica/ediciones-antteriores/simulacion-de-eventos-discretos/>> (21 abril 2015)
- Víctor de Francisco. 2004. Artículos de comercio exterior y transporte internacional. Las ventajas del transporte intermodal.
<<http://www.comercio-exterior.es/es/action-articulos.articulos+art-73+cat-12+pag-/Articulos+de+comercio+exterior/Transporte+internacional/Las+ventajas+del+transporte+intermodal.htm>> (17 Octubre 2013)

ANEXO: PRESUPUESTO

A lo largo de todo el periodo de desarrollo de este proyecto, han sido necesarios los siguientes recursos humanos y materiales:

- Recursos humanos: el tiempo invertido por el autor de este proyecto durante su desarrollo, así como la labor de ayuda, dirección y corrección de la directora del proyecto.
- Recursos materiales: se utilizaron varios ordenadores para llevar a cabo la programación del modelo de simulación, la elaboración de los ficheros de parametrización y de variables de salida y las simulaciones de los escenarios propuestos. Además, se utilizó como software MS Excel, MS Word y el entorno de simulación Witness (Witness PwE 2.0 Manufacturing Performance Edition).
- Fungibles: gastos de luz e internet derivados del uso de los ordenadores, costes de la impresión de esta memoria y gastos telefónicos derivados de las consultas con la directora del proyecto.

Para poder cuantificar el gasto realizado en cada apartado sería necesario disponer ciertos datos que se desconocen, como el coste de la licencia del software utilizado, gasto en electricidad, amortización de los ordenadores, etc.

Además, es difícil establecer la cuantía que recibirían las personas involucradas en este proyecto, ya que la dedicación al mismo no ha sido exclusiva.

Por estas razones, este anexo únicamente contiene las partidas presupuestarias a tener en cuenta para la elaboración del presupuesto, sin llegar a su cálculo numérico.